

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

«__» _____ 2020 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні технології»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Енергетична ефективність мережі LPWAN для Інтернету речей»

Виконала:

студентка IV курсу, групи ПІ-62

Подручна Анна Володимирівна _____

Керівник:

доцент кафедри ІТМ, ІТС, к.т.н., доцент

Могильний Сергій Борисович _____

Рецензент:

доцент кафедри ТК ІТС, к.т.н., с.н.с.

Міночкін Дмитро Анатолійович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Подручній Анні Володимирівні

1. Тема роботи «Енергетична ефективність мережі LPWAN для Інтернету речей» керівник роботи доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Могильний Сергій Борисович, к.т.н., доцент затверджені наказом по університету від «30» березня 2020 р. № 924-с

2. Термін подання студентом роботи 8 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: інформація про параметри, які впливають на енергетичну ефективність мережі LPWAN для Інтернету речей при розгортанні мережі LPWAN.

4. Зміст роботи

Здійснити аналітичний огляд основних технічних характеристик технології LPWAN. Здійснити огляд базових технологій та протоколів передачі даних на довгі відстані в мережах IoT та провести порівняльний аналіз технічних характеристик технологій LPWAN. Визначити та оцінити параметри, які найбільше впливають на енергетичну ефективність мережі LPWAN для

Інтернету речей. Розробити практичні рекомендації для розгортання мережі LPWAN.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

6. Дата видачі завдання 10 жовтня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір актуальної теми	11.10.2019-22.10.2019	виконано
2	Розробка, узгодження та затвердження технічного завдання на роботу. Аналітичний огляд інформаційних матеріалів. Підбір та опрацювання необхідної науково-технічної літератури	1.01.2020-31.01.2020	виконано
3	Аналітичний огляд основних технічних характеристик технології LPWAN. Огляд базових технологій та протоколів передачі даних на довгі відстані в мережах IoT	1.02.2019-28.02.2019	виконано
4	Проведення порівняльного аналізу технічних характеристик технологій LPWAN	29.02.2019-15.03.2019	виконано
5	Оцінка параметрів, які найбільше впливають на енергетичну ефективність мережі LPWAN для Інтернету речей	16.03.2019-17.04.2019	виконано
6	Формування практичних рекомендацій для розгортання мережі LPWAN	18.04.2019-16.05.2019	виконано
7	Узагальнення, підготовка підсумкового звіту. Подання роботи до приймання, та її захист	16.05.2019-18.06.2019	виконано

Студентка

Анна ПОДРУЧНА

Керівник

Сергій МОГИЛЬНИЙ

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи містить: 93 с., 32 рис., 6 табл., 17 джерел.

Актуальність теми даної роботи обумовлена тим, що з кожним роком зона покриття мережі Інтернет збільшується і разом з цим з'являються технічні можливості, що дозволяють за допомогою технології LPWAN керувати різними пристроями. У зв'язку з цим представляється актуальним питання аналізу особливостей так званих LPWAN-мереж, що задають оригінальну парадигму комунікацій, яка доповнить стільниковий зв'язок і технології бездротового зв'язку малого радіусу дії для різних додатків Інтернету речей.

Мета роботи: вибір та оцінка впливу окремих параметрів мережі LPWAN на енергетичну ефективність її роботи для Інтернету речей. Огляд базових технологій та протоколів передачі даних на довгі відстані в мережах IoT та проведення порівняльного аналізу технічних характеристик технологій LPWAN. Розроблення практичних рекомендацій для розгортання мережі LPWAN.

Ключові слова: мережі LPWAN, IoT, NB-IoT, LoRaWAN, SIGFOX, енергетична ефективність, порівняльна характеристика, розгортання мережі.

ABSTRACT

The text part of the thesis contains: 93 pages, 32 figures, 6 tables, 17 sources.

The relevance of the topic of this work is due to the fact that every year the coverage area of the Internet increases and at the same time there are technical capabilities that allow using LPWAN technology to control various devices. In this regard, it is important to analyze the features of the so-called LPWAN-networks, which set the original paradigm of communications, which will complement cellular communications and short-range wireless technologies for various applications of the Internet of Things.

Purpose: selection and evaluation of the impact of certain parameters of the LPWAN network on the energy efficiency of its operation for the Internet of Things. Review of basic technologies and protocols for long-distance data transmission in IoT networks and comparative analysis of technical characteristics of LPWAN technologies. Development of practical recommendations for the deployment of the LPWAN network.

Keywords: LPWAN, IoT, NB-IoT, LoRaWAN, SIGFOX networks, energy efficiency, comparative characteristics, network deployment.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1.	12
ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ LPWAN	12
1.1 Загальні характеристики LPWAN	12
1.1.2 Проникаюча здатність та площа покриття.....	15
1.1.3 Пропускна здатність LPWAN.....	16
1.1.4 Ефективність LPWAN-станції.....	16
1.1.5 Споживання енергії й автономність	16
1.1.6 Масштабованість.....	17
1.1.7 Час затримки передачі сигналу	17
1.1.8 Завадостійкість.....	17
1.1.9 Діапазони частот	19
1.1.10 Топологія LPWAN-мережі.....	20
1.1.11 Перспективи	21
1.1.12 Для чого IoT потрібен LPWAN	22
1.2 Технології та протоколи передачі даних на довгі відстані в мережах IoT .	23
1.2.1 LoRaWAN	24
1.2.3 Технологія SIGFOX	46
1.2.4 Технологія NB-IoT	53
1.3 Технічні відмінності : SIGFOX, LoRa та NB-IoT	60
1.4 Порівняння за показниками коефіцієнтів IoT	62
1.4.1 Якість обслуговування	62
1.4.2 Термін служби акумулятора та затримка	62
1.4.3 Масштабованість та тривалість корисного навантаження	63
1.4.4 Покриття мережі та діапазон	64
1.4.5 Модель розгортання	64

1.4.6 Вартість	65
1.5 Приклади застосування: яка технологія найкраще підходить?.....	66
1.5.1 Електролічильники	66
1.5.2 Розумне землеробство	67
1.5.3 Автоматизація виробництва	67
1.5.4 Розумна будівля	68
1.5.6 Термінали роздрібної торгівлі	68
1.5.7 Відстеження палет для логістики	68
Висновки	69
РОЗДІЛ 2.	71
ПАРАМЕТРИ, ЯКІ НАЙБІЛЬШЕ ВПЛИВАЮТЬ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕРЕЖІ LPWAN.....	71
2.1 Мінімізація енергоспоживання при використанні Raspberry Pi.....	73
Висновки	76
РОЗДІЛ 3.	77
РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ LORAWAN.....	77
3.1 Технічні характеристики	77
3.2 Розгортання мережі LORAWAN	83
Висновки	89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

LPWAN	Low-power Wide-area Network – енергоефективна мережа дальнього радіусу дії
IoT	Internet of Things – Інтернет речей
RFID	Radio Frequency Identification – радіочастотна ідентифікація
BPSK	Binary phase-shift keying – двійкова фазова маніпуляція
SNR	Signal-to-noise ratio – співвідношення сигнал/шум
FSK	Frequency Shift Keying – частотна маніпуляція
RSSI	Received Signal Strength Indication – пристрій для вимірювання рівня потужності сигналу
LoRa	Long Rang – назва протоколу фізичного рівню та технології, які використовують метод модуляції оснований на техніці розширення спектру
LTE	Long-Term Evolution – назва мобільного протоколу передачі даних четвертого покоління
M2M	Machine-to-Machine – технологія машино-машинної взаємодії, що дозволяє передавати дані між різними пристроями
NB-IoT	Narrow Band Internet of Things – стандарт стільникового зв’язку, який використовується для пристроїв телеметрії з низьким об’ємом обміну даних
3GPP	3rd Generation Partnership Project – консорціум, який розробляє пецифікації для мобільної телефонії
QoS	Quality of Service – якість обслуговування
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – це метод мультиплексування, який підрозподіляє даний радіоспектр на набір ортогональних піднесучих, через які передається інформація

QPSK	Quadrature Phase Shift Keying – квадратурна фазова маніпуляція
GPIO	General-purpose input/output Інтерфейс – введення/виведення загального призначення
UART	Universal asynchronous receiver/transmitter – універсальний асинхронний приймач/передавач

ВСТУП

Останнім часом для бездротових технологій характерний пошук рішень щодо скорочення енергоспоживання і збільшення дальності передачі. В результаті таких пошуків була створена LPWAN-технологія. LPWAN — це бездротова технологія, розроблена для розподілених мереж телеметрії, міжмашинної взаємодії та Інтернету речей. Новий клас бездротових технологій під загальною назвою «мережі з низьким енергоспоживанням та широким охопленням» (LPWAN) має ряд загальних характеристик, які ідеально підходять для додатків Інтернету речей. Ці характеристики включають оптимізацію енергоспоживання радіопередачі, спрощену мережеву топологію, пакети розміром в кілька десятків байт, що передаються кілька разів на день з дуже малою швидкістю, і, в основному, висхідний трафік, завдяки чому пристрої основну частину часу можуть перебувати в режимі глибокого сну зі зниженим енергоспоживанням. Дані характеристики дозволяють вести передачу на відстані до декількох кілометрів, забезпечують довгий термін роботи від батареї (до десяти років роботи з використанням джерела живлення типу “таблетка”), а також просте і масштабоване розгортання із застосуванням дешевих пристроїв і простих інфраструктур. Функції мереж LPWAN добре підходять для багатьох додатків IoT, де не треба передавати дані з датчиків на високій швидкості, і де неможливо забезпечити живлення від електромережі або часту заміну автономних джерел живлення.

LPWAN-технологія ґрунтується на можливостях радіосистем, щодо підвищення енергетики. При зменшенні бітової швидкості передачі, є можливість вкласти більше енергії в кожен біт, що дозволить легше виділити його на тлі шумів в приймальній частині системи. Таким чином, зменшуючи швидкість передачі, збільшується дальність прийому. Варто відзначити, що

LPWAN є однією з бездротових технологій, що забезпечує середовище збору даних з різного обладнання: лічильників, сенсорів тощо.

Для роботи в ліцензованому діапазоні частот 3GPP стандартизувала вузькосмугову технологію радіопередачі NB-IOT, для швидкості розгортання може використовувати наявну інфраструктуру LTE і співіснувати з ними в тому ж частотному діапазоні. Ще один тип технологій LPWAN (LoRa, SIGFOX), призначений для роботи в неліцензованих діапазонах промислових, наукових і медичних частот (ISM).

Актуальність даної технології LPWAN полягає в тому, що з кожним роком зона покриття мережі Інтернету збільшується і разом з цим з'являються технічні можливості, що дозволяють за допомогою цієї технології керувати різними пристроями. У зв'язку з цим представляється актуальним питання аналізу особливостей так званих LPWAN-мереж, що задають оригінальну парадигму комунікацій, яка доповнить стільниковий зв'язок і технології бездротового зв'язку малого радіусу дії для різних додатків Інтернету речей.

Основним внеском дипломної роботи є наступні питання:

- Порівняльний аналіз технічних характеристик технологій LPWAN, що дозволяє виявити більш ефективні технології мережі LPWAN для Інтернету речей. Використовується метод порівняння параметрів кожної з технологій LPWAN на основі зарубіжної літератури, наукових статей і публікацій.
- Оцінка параметрів, які найбільше впливають на енергетичну ефективність та просторове охоплення мережі LPWAN. Отримані результати дозволять виявити параметри, які впливають на ефективність технологій мережі LPWAN для Інтернету речей.
- Розроблення практичних рекомендацій для розгортання мережі LPWAN.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ LPWAN

1.1 Загальні характеристики LPWAN

LPWAN (Low-power Wide-area Network) — новітній різновид бездротових мереж, розроблений для передачі даних телеметрії різних пристроїв, сенсорів і приладів обліку на далекі відстані. Поява мереж LPWAN, головним чином, пов'язана з потребами міжмашинного спілкування (Machine-to-machine, M2M) і передачею даних в рамках концепції «Інтернету речей» (Internet of Things, IoT).[1]

Перше, що потрібно зрозуміти, це те, що LPWAN не є стандартом. Це широкий термін, що охоплює різні реалізації та протоколи, як власні, так і з відкритим вихідним кодом, які мають загальні характеристики:

- Низька потужність: приймачі LPWAN, оптимізовані для енергоспоживання, можуть працювати на невеликих недорогих батареях протягом 10-15 років, знижуючи витрати на обслуговування [2].
- Дальність дії: робочий діапазон технології LPWAN варіюється від декількох кілометрів у міських районах до понад 15 км у сільській місцевості. Він також може забезпечити ефективну передачу даних в раніше недоступних частинах приміщень і під землею [2].
- Низька вартість: спрощені та легкі протоколи LPWAN зменшують складність апаратного проектування та знижують витрати на розробку пристроїв. Великий радіус дії в поєднанні зі зіркоподібною топологією знижують дорогі інфраструктурні вимоги, а

використання неліцензійних смуг дозволяє зменшити мережеві витрати.

Фізичним обмеженням для досягнення малої потужності та широкого діапазону є невеликий розмір даних, які передаються. Більшість технологій LPWAN можуть надсилати лише менше ніж 1000 байт даних на день або менше ніж 5000 біт на секунду [2]. Ці характеристики роблять LPWAN відмінним вибором для наступних класів додатків IoT:

1. Щільне розташування: міста або великі будівлі для розумного освітлення, "розумної" мережі та відстеження активів.
2. Довгостроковий період автономної роботи.

Технології LPWAN ідеально підходять для з'єднання пристроїв, яким потрібно передавати малі обсяги даних на великі відстані, зберігаючи при цьому тривалий термін служби батареї. Деякі додатки Інтернету речей тільки передають незначні обсяги інформації. Низький рівень споживання енергії таких пристроїв дозволяє вирішувати завдання з мінімальною вартістю і відсутністю необхідності частого заміни батареї. Це відрізняє LPWAN від інших протоколів бездротової мережі, таких як Bluetooth, RFID, стільниковий M2M і ZigBee, показаних на рис.1.1 щодо пропускну здатності й дальності дії. Наприклад, Wi-Fi, маючи високу пропускну здатність в кілька Мбіт/с та обмеження на дальність в межах 100-200 метрів, найчастіше використовується для побудови бездротових локальних мереж в межах офісу, квартири або будинку.

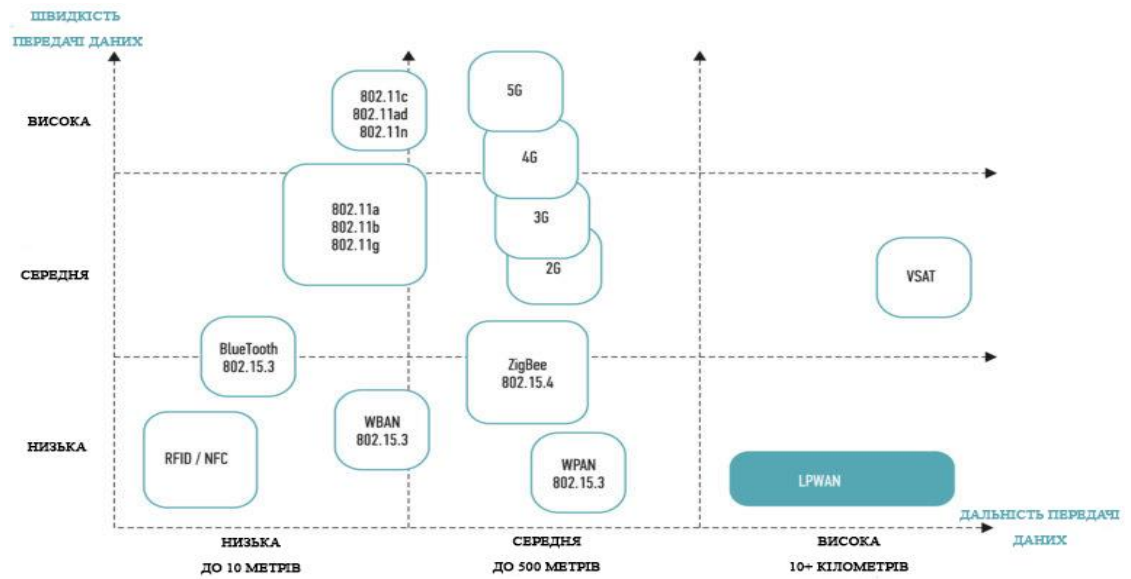


Рис. 1.1 Порівняння бездротових технологій за дальністю і швидкістю передачі даних

Діаграма з порівнянням характеристик бездротових мереж, що застосовуються для телеметрії, наведена на рис. 1.2.

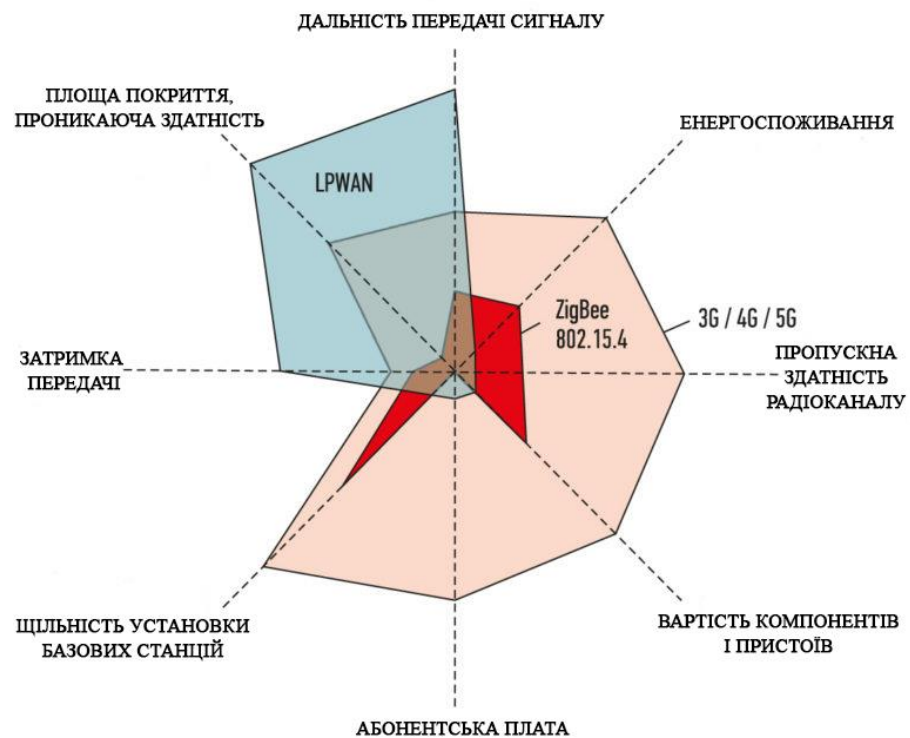


Рис. 1.2. Порівняння характеристик LPWAN, 3G, Zigbee

1.1.2 Проникаюча здатність та площа покриття

Особливість технології радіозв'язку LPWAN — висока проникаюча здатність. Енергетичний потенціал каналу зв'язку становить 166 дБ. Цього достатньо, щоб сигнал легко проходив з підвалів, а також через бетонні стіни й металеві шафи. Крім того, сигнал неможливо заглушити, оскільки передача відбувається в широкому діапазоні частот.

Практичні тести підтверджують: базова станція, встановлена на даху 24-поверхової будівлі, успішно приймає сигнали від пристроїв, що знаходяться в підвалі того ж будинку. Радіосигнал може долати дерев'яну стіну в 7 см завтовшки, далі цегляну стіну в 10 см, бетонну стіну в 12 см, після чого проходить 16 км вільного простору до базової станції в умовах щільної міської забудови. [3]

Має високу проникаючу здатність і при цьому не вимагає побудови складної мережевої архітектури. Технологія LPWAN набагато краще підходить для побудови бездротової мережі, ніж той самий стільниковий зв'язок. Десятки квадратних кілометрів можуть бути покриті однією базовою станцією. Побудова такої мережі простіше, а обслуговування дешевше.

Так, наприклад, радіус дії базової станції в межах міста перевищує 10 км, а за межами міста обмежується видимістю горизонту й становить в середньому 50 км. Таким чином площа покриття: в міських умовах — понад 300 кв. км, на відкритій місцевості — близько 8 000 кв. км.

Подібний підхід стає єдиною альтернативою в разі, якщо датчики рознесені по великій території, як, наприклад, лічильники води в межах одного мікрорайону або датчики вологості ґрунту, розміщені відразу на декількох полях.

1.1.3 Пропускна здатність LPWAN

Швидкість передачі даних, в залежності від конкретної розв'язуваної задачі, становить 50 - 1 000 біт/сек. Оскільки для більшості рішень IoT і M2M більш висока пропускна здатність каналу зв'язку не є принциповою, це відкриває можливості для поліпшення інших більш важливих параметрів мережі.

1.1.4 Ефективність LPWAN-станції

Такий мегаполіс, як Київ, налічує сотні тисяч вишок стільникових операторів, які забезпечують повне покриття столиці, а у випадку з LPWAN-мережею кількість станцій, достатня для її повного покриття, обмежується декількома десятками, від 40 до 100. У такому випадку кожна станція повинна витримувати навантаження в кілька сотень тисяч різних «розумних» приладів обліку і сенсорів.

Беручи до уваги високі вимоги до потужностей станцій, застосовуються технології паралельної обробки радіосигналу за допомогою високопродуктивних процесорів. Такий підхід забезпечує велику місткість LPWAN-мережі, в якій кожна станція може обробляти дані з мінімум 2 млн. «розумних» пристроїв.

1.1.5 Споживання енергії й автономність

Переважна більшість телематичних пристроїв вимагають наявності автономного живлення від батареї з терміном служби в кілька років.

Пристроєм не потрібно багато енергії для відправки пакета даних, яка триває в середньому секунду. Весь інший час пристрій "спить". В результаті

батарея AA-типу служить протягом декількох років, економлячи кошти й час на обслуговування системи в цілому.

1.1.6 Масштабованість

Максимальна кількість точок обліку, яке може одночасно обслуговувати одна базова станція, практично необмежено. Одна станція може приймати дані з декількох сотень тисяч пристроїв в межах свого радіусу дії. LPWAN-мережа масштабується до потрібного розміру тільки внаслідок додавання нових датчиків без проміжного обладнання, mesh-архітектури й зниження надійності.

У LPWAN-мережі можуть одночасно працювати самі різноманітні пристрої. Наприклад, одна базова станція може приймати дані з лічильників води, електрики й тепла, датчиків протікання, відкриття дверей або наявності задимлення.

1.1.7 Час затримки передачі сигналу

Час затримки передачі сигналу складає кілька секунд. Але, як правило, рішення IoT і M2M невимогливі до швидкості передачі сигналу. Некритично, якщо показання лічильника газу або датчика вологості потраплять в панель керування оператора тільки через декілька секунд після зчитування їх сенсором.

1.1.8 Завадостійкість

Для забезпечення великої дальності дії в бездротовому зв'язку необхідно забезпечити значний динамічний діапазон приймача. Динамічний діапазон для LPWAN пристроїв становить близько 141-161 дБ. [4] Це досягається високою чутливістю приймача, яка знаходиться на рівні -132 dBm і менше. Чим нижче

модуляція, тим вище чутливість приймача. Теорема теорії інформації говорить, що енергія на символ або енергія на біт є основним важелем для зміни можливості прийому повідомлення. Знижуючи рівень модуляції, збільшується енергетика кожного символу і, як наслідок збільшується чутливість приймача. Як приклад можна привести технологію SigFox, що використовує вузькосмугові сигнали (99 Гц) з модуляцією BPSK і швидкістю передачі 295 біт/с (небагато за сучасними мірками). Приймач може детектувати такі сигнали при співвідношенні сигнал / шум порядку +10 дБ. [4]

Одним із способів підвищення ефективності передачі інформації є розширення спектру і використання сигналів з великою базою. Розширення спектру дозволяє передавати дані по каналах зі значними лінійними спотвореннями (завмираннями) і при негативних значеннях сигнал/шум. Наприклад, технологія LoRa дозволяє приймати сигнал з рівнем SNR до -21 дБ.

Енергія шуму на вході приймача визначається двома речами — спектральною щільністю потужності шуму і шириною смуги сигналу. В смузі частот 100 Гц рівень теплового шуму складає близько -153dBm, що означає, що, якщо для детектування BPSK сигналів потрібно забезпечити рівень $SNR = +10\text{dB}$ чутливість приймача повинна становити -143dBm ($= 10\text{dB} - 153\text{dBm}$). У смузі частот 124 кГц рівень теплового шуму буде вже близько -122dBm. Отже, для досягнення рівня $SNR = -20\text{ dB}$, необхідного для детектування сигналів LoRa, чутливість приймача повинна становити -142dBm ($-20\text{dB} - 122\text{dBm}$). [4] Отже, зроблена оцінка показує, що теоретична стійкість вузькосмугових і кодованих сигналів (в присутності білого шуму) одна і та ж.

Однак, вузькосмугові завади можуть зробити повністю неможливим детектування таких сигналів, як BPSK (якщо заважає сигнал, то потрапляє чітко всередину корисного каналу). При використанні ж кодованих сигналів вузькосмугова перешкода додається до загального шуму в смузі частот, збільшуючи його загальний рівень.

Значущим поняттям, що визначає ємність і стійкість системи, є ортогональність. Два сигнали вважаються ортогональними, коли їх скалярний добуток, а значить і взаємна кореляційна функція дорівнює 0. Ортогональність дозволяє виявити кілька потоків даних в одному і тому ж каналі в один і той же час. Ця властивість властива тільки кодованим каналам, і дозволяє отримувати хорошу спектральну ефективність для систем з широким спектром (наприклад, LoRa).

1.1.9 Діапазони частот

Більшість наявних LPWAN технологій використовують неліцензований діапазон - ISM, проте допускають роботу і в ліцензованому діапазоні частот.

У серпні 2015 року Groupe Speciale Mobile Association оголосила про плани стандартизації технології LPWAN на ліцензованому спектрі. Ця пропозиція отримала схвалення і підтримку з боку таких компаній, як AT & T, Bell Canada, China Mobile, Vodafone (дані Telecom TV4).

Істотний недолік використання LPWAN технологій в неліцензованих діапазонах частот полягає в відсутності доступності однакового спектра по всьому світу. У кожній країні існують різні правила використання субгігерцового спектра. Зазвичай існують два табори: ті, які орієнтуються на Європу (868 МГц), і ті, хто орієнтується на США (915 МГц). [2] Смуга частот 915 МГц вільна приблизно в однієї третини країн, і більшості країн цей діапазон зайнятий. При цьому, багато країн додали спеціальні обмеження, які роблять стандартизацію в даному діапазоні практично неможливою. Поки ця проблема не буде вирішена, для технологій LPWAN відсутня глобально доступна смуга, наприклад, на рівні 2.4 ГГц (як для Bluetooth і Wi-Fi).

1.1.10 Топологія LPWAN-мережі

Підхід, який використовується для побудови LPWAN-мережі, схожий з принципом роботи мереж мобільного зв'язку. LPWAN-мережа використовує топологію «зірка» (рис. 1.3) на відміну від деяких технологій Short Range, що використовують mesh-структуру мережі, де кожен пристрій взаємодіє з базовою станцією безпосередньо. Недоліки mesh-мереж пов'язані з тим, що динамічний діапазон даних з'єднань дуже сильно обмежений у зв'язку з високою швидкістю передачі й низькою чутливістю приймача. Деякі ZigBee з'єднання мають проблеми з відправленням даних більш ніж на 20-30 метрів, у зв'язку з малою потужністю передавача і як наслідок — сильним загасанням. Крім того, для створення надійної mesh-мережі необхідно використання достатньої великої кількості елементів. [1]

Базові станції приймають і оцифровують сигнали від LPWAN-пристроїв, передаючи їх далі на сервер. На серверах дані від всіх станцій в мережі обробляються і надаються в зручному для користувача вигляді. Зворотний канал зв'язку дозволяє управляти пристроями віддалено.

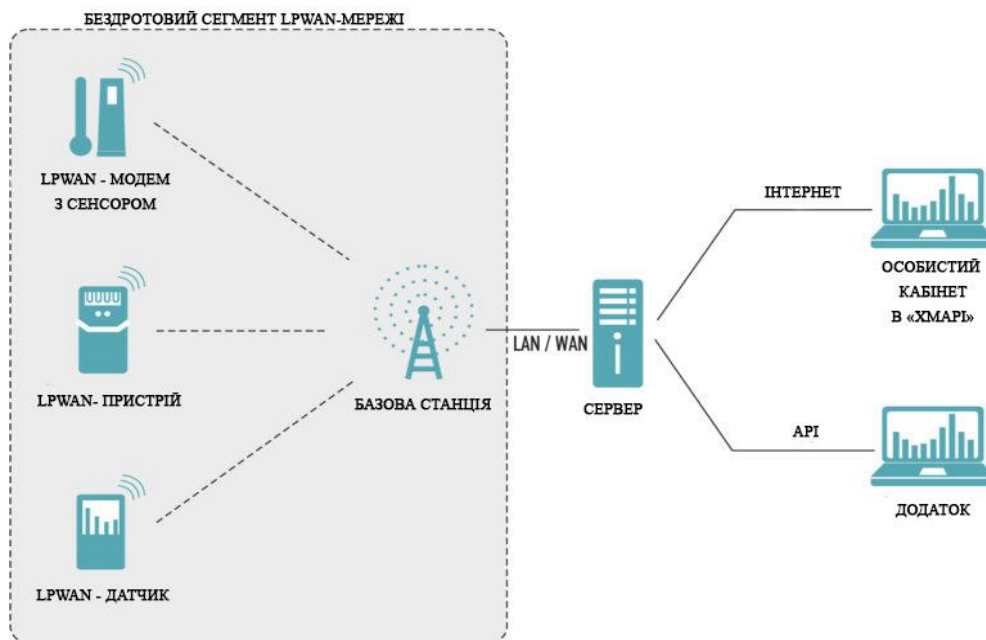


Рис. 1.3. LPWAN-мережа, топологія «зірка»

Крім того, відмовостійкість всієї системи підвищується внаслідок формування єдиної точки відмови. Наприклад, в ZigBee-системах концентратори встановлюються без запасу за охопленням, щоб уникнути зайвого подорожчання рішення. При відмові концентратора зникають всі лічильники в його радіусі дії. Тим часом, у випадку з LPWAN відмова кінцевої точки ніяк не впливає на працездатність інших пристроїв.

Топологія бездротової технології LPWAN є мережа "зірка із зірок" (рис.1.4), в якій кожна базова станція приймає дані з різномірних датчиків та передає на сервер для майбутньої обробки.

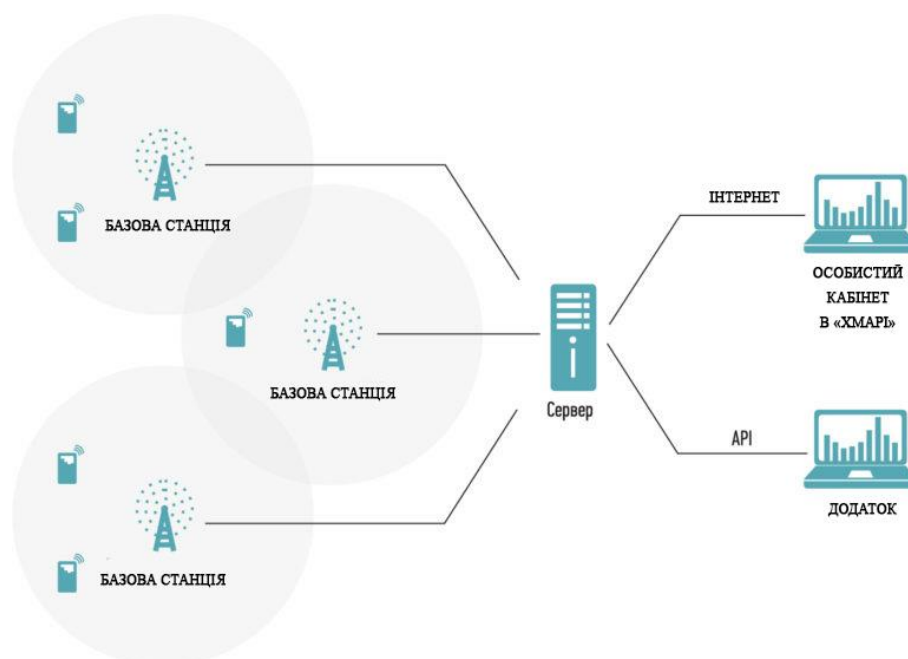


Рис. 1.4. LPWAN-мережа, топологія «зірка із зірок»

1.1.11 Перспективи

За прогнозами IDTechEx, в найближчі 10 років до мереж LPWAN буде під'єднано близько 12 млрд. пристроїв. Основні області застосування таких технологій включають «розумні» будинки і міста, відстеження активів й сільське господарство.

За прогнозами Riot Research, ринок LPWAN у 2017-23 рр. буде рости в грошовому вираженні з показником CAGR, рівним 45%, і до кінця прогнозного періоду досягне \$ 19,1 млрд. При цьому частки різних технологій LPWAN істотно зміняться. Так, значно зросте кількість технологій NB-IoT і LTE-M, які використовують ліцензований спектр, в результаті чого ці технології до кінця прогнозного періоду будуть домінувати за кількістю підключень. [3]

Схожі прогнози робить компанія Lux Research, на думку аналітиків якої, лідерство NB-IoT буде обумовлено більш широким географічним покриттям в порівнянні з іншими технологіями LPWAN (Sigfox, LoRaWAN і ін.), А також «ефектом масштабу» — в 2016 р. сукупна виручка операторів, що розглядають в якості пріоритетної технології LPWAN стандарт NB-IoT, склала \$ 578 млрд євро проти \$ 416 млрд в операторів LoRa і Sigfox в сукупності. В результаті до 2022, за прогнозами Lux Research, на частку NB-IoT доведеться понад 90% підключень у світі. [3] При цьому LoRaWAN, швидше за все, буде доповнювати NB-IoT в деяких додатках.

1.1.12 Для чого IoT потрібен LPWAN

Інтернет речей дозволяє підключати, вимірювати та контролювати мільйони пристроїв для автоматизації процесів й операцій та підтримки кращого прийняття рішень. Очікується, що IoT видасть величезну кількість інформації, яка буде використовуватися для оптимізації споживання всіх видів ресурсів та підвищення ефективності все більш взаємопов'язаних систем. IoT також покращить або створить нові сервіси, які принесуть стійку цінність для бізнесу, споживачів та загального середовища. Сьогодні IoT вже впливає на бізнес-моделі багатьох галузей та послуг, таких як побутова електроніка, автомобілебудування, комунальні послуги, управління об'єктами, розумні будівлі, електронне здоров'я, ланцюги постачання або виробничі програми.

Поширення Інтернету речей підтримується низькопотужними широкомасштабними мережами (LPWAN), що дозволяють передавати інформацію за низькою вартістю. LPWAN — це тип бездротової широкосмугової телекомунікаційної мережі, який також називається широкосмуговою мережею малої потужності (LPWA) або малопотужною мережею (LPN), призначений для забезпечення зв'язку на великій відстані з низькою швидкістю передачі даних між підключеними об'єктами, наприклад датчиками, що працюють на акумуляторі. Низька потужність, низька швидкість передачі та використання за цільовим призначенням відрізняють цей тип мережі від бездротової WAN, призначеної для підключення користувачів або бізнесу та передавання більше даних, використовуючи більше енергії.

1.2 Технології та протоколи передачі даних на довгі відстані в мережах IoT

Комунікація є однією з найважливіших частин будь-якого проекту IoT. Хоча існує безліч протоколів зв'язку, кожному з них не вистачає тих чи інших характеристик, що робить їх «не зовсім придатними» для додатків IoT. Основними проблемами є енергоспоживання, радіус покриття і пропускна здатність.

З огляду на майбутнє IoT і підключення всіх видів "речей", розташованих у всіх місцях, виникла потреба в комунікаційному середовищі, спеціально розробленому для IoT, яка підтримує його вимоги, зокрема, відносно малої потужності й значно великої дальності, дешевий, безпечний і простий в розгортанні. Ці мережі називаються LPWAN. У просторі LPWAN існує низка стандартів, серед яких LoRa, ультравузька смуга (UNB), NarrowBand IoT (NB-IOT), SIGFOX, Weightless та інші. Далі будуть розглянуті основні технології мережі LPWAN.

1.2.1 LoRaWAN

LoRa (Long Range) — це запатентована технологія модуляції, яка застосовується на фізичному рівні, що дозволяє здійснювати далекі енергоефективні передачі даних. LoRa зазвичай має діапазон від 5 до 15 км, і один шлюз LoRa може забезпечити покриття для всього міста. Технологія розроблена Cycleo у Франції і вийшла на перший план, коли компанія була придбана Semtech у 2012 році. [5] У Semtech використовували модулі Lora з Arduino і Raspberry Pi, і результат роботи виявився передбачувано хороший.

Метод заснований на технології модуляції з розширеним спектром (spread spectrum modulation) і варіації лінійної частотної модуляції (CSS) з інтегрованою прямою корекцією помилок (FEC). [5] Метод модуляції з розширеним спектром використовують для досягнення більш високого діапазону зв'язку при збереженні характеристик низької потужності, які аналогічні радіосигналам на основі фізичного рівня модуляції FSK (Frequency Shift Keying), яка застосовується в багатьох застарілих бездротових системах. Технологія розширення спектру застосовується у військовій та космічній комунікаціях протягом десятиліть завдяки великим відстаням зв'язку і завадостійкості, але LoRa — це перша недорога реалізація для комерційного використання. Модель OSI для технології LoRa (Long Range) показана на рис. 1.5.



Рис.1.5 Модель OSI для технології LoRa

Технологія LoRa не залежить від частоти, зв'язок між радіопередавачами LoRa здійснюється за допомогою використання неліцензованих радіочастотних діапазонів з частотою менше 1 ГГц, які доступні по всьому світу. Ці частоти варіюються від регіону до регіону і часто також різняться між країнами. Наприклад, 868 МГц зазвичай використовується для зв'язку LoRa в Європі, а 915 МГц використовується в Північній Америці. Незалежно від частоти, LoRa може використовуватися без будь-яких істотних змін в технології. При використанні більш низьких частот, ніж у комунікаційних модулів, таких як WiFi, на основі діапазонів ISM 2,4 або 5,8 ГГц, дозволяє значно збільшити зону покриття, особливо для ситуацій з NLOS перешкодами. Важливою перевагою використання LoRa в Україні є той факт, що без ліцензування дозволені смуги 868,0-868,6 МГц з максимальною випромінюваною потужністю до 25 мВт, і 433,04-434,79 МГц з максимальною випромінюваною потужністю до 10 мВт.

LoRa використовує комбінацію змінних пропускної здатності й коефіцієнтів розширення (SF7-SF12) (таблиця 1.1), щоб адаптувати швидкість передачі даних відповідно до дальності передачі. Більш високий коефіцієнт поширення дозволяє збільшити дальність внаслідок більш низької швидкості

передачі даних і навпаки. Комбінація смуги пропускання і коефіцієнта розширення може бути обрана відповідно до умов лінії зв'язку і рівнем даних, які повинні бути передані. Таким чином, більш високий коефіцієнт розширення покращує характеристики передачі й чутливість для даної смуги пропускання, але також збільшує час передачі в результаті більш низьких швидкостей передачі даних. Вони можуть варіюватися від 18 до 40 Кбіт/с.

Таблиця 1.1

Комбінація змінних пропускної здатності й коефіцієнтів розширення

Коефіцієнт поширення	Максимальний обсяг корисної інформації в пакеті, байт	Орієнтовний час в ефірі, мс	Скорість передачі, бит/с
SF12/125 кГц	51	1908	292
SF11/125 кГц	51	1036	537
SF10/125 кГц	115	575	976
SF9/125 кГц	222	308	1757
SF8/125 кГц	222	175	3125
SF7/125 кГц	222	98	5468

SF (Spreading Factor) – це коефіцієнт розширення спектра, аналог індексу в модуляції. У спрощеному розумінні SF - це число від 7 до 12, до якого співвідноситься ряд характеристик, таких як максимальна швидкість передачі даних і розмір пакета. Чим вище SF, тим більше зменшення швидкості передачі, але тим вище захист від перешкод. В іншому випадку, чим менше SF, тим вище швидкість, гірше стійкість до перешкод. До параметра SF прив'язано також час перебування в ефірі.

Рівень потужності, що використовується радіопередавачем LoRa, є адаптивним. Він залежить від таких факторів, як швидкість передачі даних і умови з'єднання серед інших. Коли потрібна швидка передача, передана

Створений на початку 2015 року і є однією з найбільш швидкозростаючих технологічних груп, Альянс в даний час налічує понад 500 членів (рис. 1.6), [4] починаючи від основних мережевих операторів і закінчуючи виробниками шлюзів і пристроїв, постачальниками програмного забезпечення та сервісів, системними інтеграторами й кінцевими користувачами, які впроваджують цю технологію.

Завдяки стандартизації та акредитованій схемі сертифікації, LoRa Alliance забезпечує функціональну сумісність, необхідну для масштабування мереж LPWA, що робить LoRaWAN провідним рішенням для глобального розгортання мереж LPWAN. Більш ніж половина всіх національних мереж LoRaWAN у всьому світі працюють на платформі ThingPark Actility (рис. 1.7), яка підтримує розгортання LoRaWAN основними глобальними мережевими операторами, включаючи Orange, Comcast, NTT, Softbank, Proximus, KPN, Swisscom, Enforta та інші.

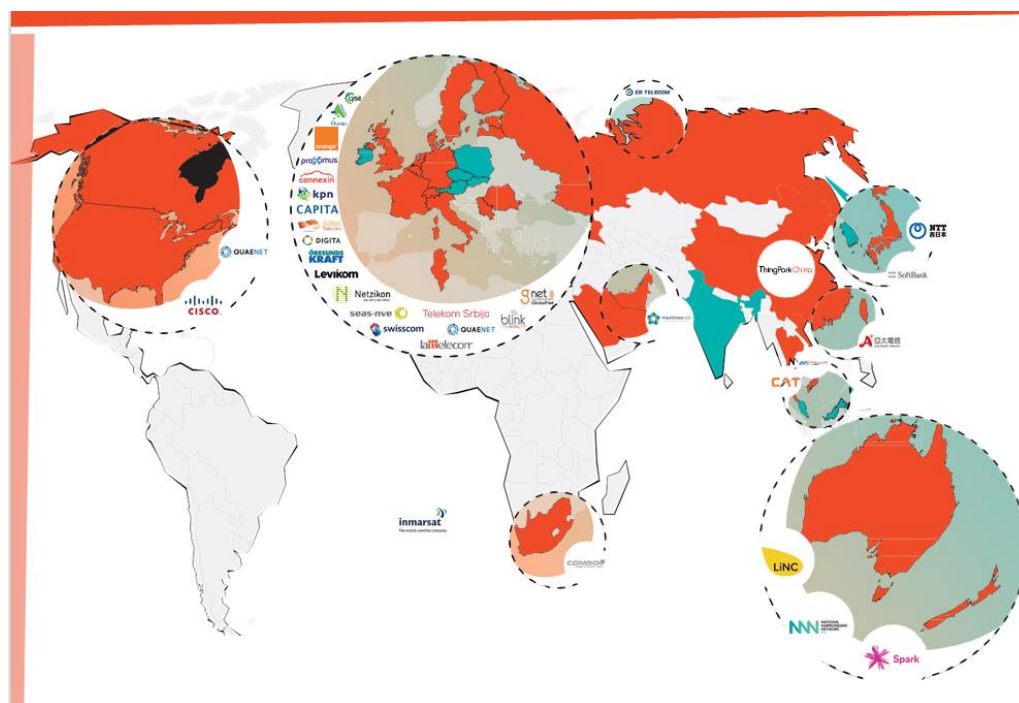


Рис.1.7 Національні мережі LoRaWAN, які працюють на платформі ThingPark Actility

Архітектура мережі LoRaWAN

На відміну від топології стільникової мережі, прийнятої в більшості мереж, LoRaWAN використовує архітектуру по типу зірка, тому замість того, щоб кожен кінцевий пристрій був завжди включений, повторюючи передачу від інших пристроїв для збільшення дальності, кінцеві пристрої в мережі LoRaWAN зв'язуються безпосередньо зі шлюзами й працюють тільки тоді, коли їм потрібно зв'язатися зі шлюзом, оскільки дальність зв'язку не є проблемою. Це є фактором, що сприяє низькому енергоспоживанню і високому часу автономної роботи, отриманим в кінцевих пристроях.

Ще одна унікальна особливість мереж LoRaWAN полягає в тому, що повідомлення у висхідній лінії зв'язку можуть прийматися будь-яким шлюзом. Це функція мережевого сервера для управління пом'якшенням зіткнень та видалення дублікатів у висхідній лінії зв'язку та вибору найкращого шлюзу для передачі по низхідній лінії зв'язку на основі оцінок RSSI висхідної лінії. Це дозволяє легко вбудувати в розгортання LoRaWAN такі функції, як геолокація. Це також забезпечує макрорізноманітність висхідної лінії зв'язку, що значно підвищує пропускну здатність мережі, якість обслуговування (QoS) та збільшує термін служби акумуляторів пристроїв. [4]

Архітектура мережі LoRa складається з чотирьох основних частин (рис.1.8):

1. Кінцеві пристрої.
2. Шлюз.
3. Мережевий сервер.
4. Сервер додатків.

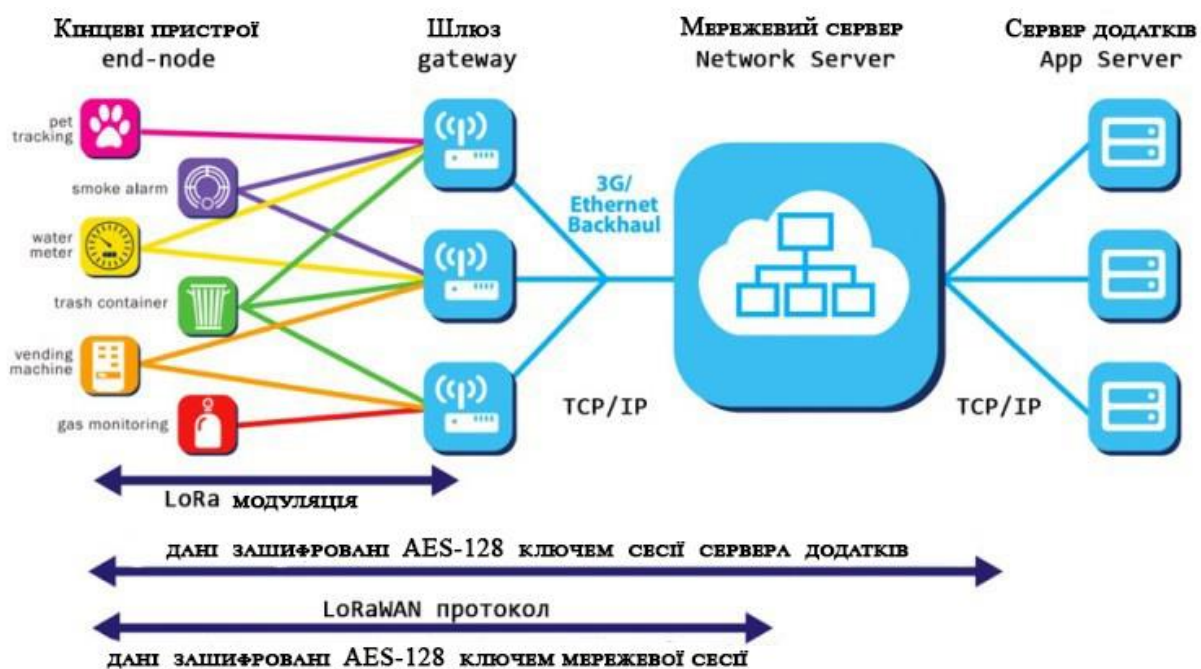


Рис.1.8 Архітектура мережі LoRaWAN

Кінцеві пристрої LoRa (кінцеві вузли, end-node) — це елементи, які виконують функції вимірювання, управління і / або контролю, двосторонній обмін даними, як від кінцевих точок до сервера, так і назад. Вузли мережі здійснюють передачу не постійно, а лише через певні проміжки часу згідно із заданим графіком. Решту часу трансивери кінцевих вузлів знаходяться або в неактивному стані, або в стані прийому для отримання відповіді від сервера, в залежності від класу пристрою (A, B або C). [9]

Три основні класи:

1. Двонаправлені кінцеві пристрої (клас A)

Сеанс зв'язку ініціює термінал. Основне завдання — передавати дані від пристрою до мережі, прийом даних можливий тільки відразу після передачі. Пристрої класу A після кожної передачі відкривають два коротких тимчасових вікна на прийом (позначаються як RX1 і RX2) (рис.1.9). [9]

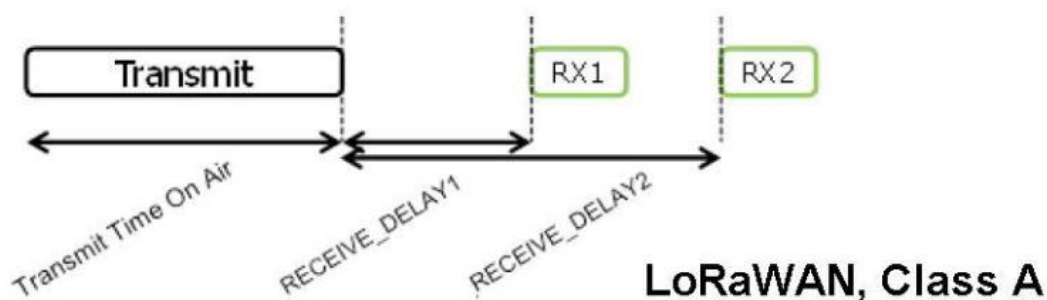


Рис.1.9 Двонаправлений зв'язок між кінцевим пристроєм та базовою станцією для класу А. LoRaWAN

Інтервали від кінця передачі до відкриття першого і другого тимчасових вікон можуть конфігуруватися, але повинні бути однаковими для всіх пристроїв в даній мережі (RECEIVE_DELAY1, RECEIVE_DELAY2). Для європейського діапазону 868 МГц рекомендоване значення RECEIVE_DELAY 1 становить 1 секунду. Значення RECEIVE_DELAY 2 має дорівнювати (RECEIVE_DELAY 1 + 1) секунда. Використовувані частотні канали й швидкості передачі для інтервалів RX1 і RX2 можуть відрізнятися.

Пристрої класу А більшу частину часу знаходяться в режимі сну, періодично прокидаються, відправляють дані, незначний час очікують підтвердження від сервера, потім знову «засинають» до наступного сеансу відповідно до свого розкладу. Такий режим роботи, забезпечує максимальне енергозбереження, має і недолік: в період між коротким обміном даними пристрої недоступні для сервера, і останньому доводиться чекати чергового сеансу зв'язку.

2. Двонаправлені кінцеві пристрої з запланованими слотами прийому (клас В)

На додаток до вікон прийому, визначених для пристроїв класу А, пристрої класу В відкривають додаткові вікна прийому за розкладом. Для синхронізації

часу відкриття додаткових вікон прийому шлюзи випромінюють маячки. Всі шлюзи, що входять до складу однієї мережі, повинні випромінювати маячки одночасно. Маячок містить ідентифікатор мережі та мітку часу (UTC). [9]

Використання класу В гарантує, що при опитуванні кінцевих пристроїв затримка відгуку не перевищуватиме певну величину, яка визначається періодом маячків.

Пристрої класу В надають розумну альтернативу: більшу частину часу вони знаходяться в режимі сну, але, однак, між відправками даних регулярно «прокидаються» і деякий час слухають ефір. Ці часові інтервали строго синхронізовані з сервером. Таким чином, передача даних на пристрій класу В здійснюється набагато швидше, ніж на пристрій класу А, тому що не треба чекати чергового сеансу передачі даних. На сьогодні практично немає вільного серверного програмного забезпечення з підтримкою пристроїв класу В.

3. Двонаправлені кінцеві пристрої з максимальними слотами прийому (клас С)

Пристрої класу С знаходяться в режимі прийому практично весь час за винятком проміжків, коли вони передають повідомлення. За винятком тимчасового вікна RX1 кінцевий пристрій використовує параметри прийому RX2 (рис. 1.10). Таким чином, сеанс зв'язку, як і для пристроїв класу В, може бути ініційований і пристроєм, і мережею.

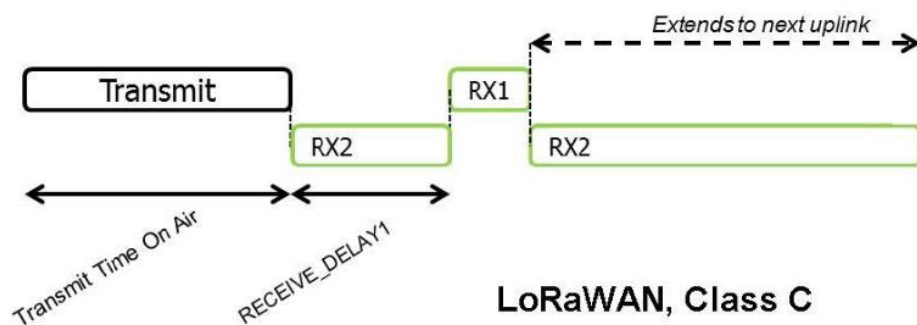


Рис.1.10 Двонаправлений зв'язок між кінцевим пристроєм та базовою станцією для класу С LoRaWAN

Пристрої класу С застосовуються в додатках, де швидкість реакції на команду, отриману від мережі, важливіше економії електроживлення, а також в тих випадках, коли пристрою необхідно отримувати через IoT-мережу великі обсяги даних.

В даний час доступна величезна кількість пристроїв для виконання широкого спектра використання Інтернет речей, що обслуговуються LoRaWAN (рис. 1.11). Багато з них працюють від акумуляторів, маючи до 10 років автономної роботи завдяки акумуляторам LoRaWAN з низькою потужністю. Серед різних виробників пристроїв для LoRaWAN є Bosch, Schneider Electric, Yokogawa, STMicroelectronics, Birdz (Veolia) та багато інших.



Рис.1.11 Приклади пристроїв для мережі LoRaWAN

Шлюзи (також називаються концентраторами) — це пристрої, підключені до мережевого сервера через стандартні IP-з'єднання, які ретранслюють повідомлення між серверною частиною центральної мережі та кінцевими пристроями, використовуючи протокол бездротового зв'язку з одним стрибком. [4] Вони призначені для підтримки двонаправленого зв'язку й оснащені багатоадресною передачею, що дозволяє програмному забезпеченню відправляти повідомлення масового поширення, такі як бездротові оновлення.

В основі кожного шлюзу LoRa лежить багатоканальний демодулятор LoRa, здатний декодувати всі варіанти модуляції на декількох частотах паралельно.

Для оператора великомасштабної мережі ключовими відмінними факторами повинні бути продуктивність радіозв'язку (чутливість, потужність передачі), застосування мікросхеми SX1301 до шлюзу MCU (USB-SPI або SPI-SPI) підтримка і розподіл PPS. Повинен бути також сигнал, доступність якого забезпечує точну синхронізацію часу по всій сукупності шлюзів в мережі. [6]

Для забезпечення життєздатності радіальної зіркоподібної мережевої архітектури великого радіуса дії, шлюз повинен мати дуже високу пропускну здатність або можливість приймати повідомлення від дуже великої кількості вузлів. Висока пропускну здатність в мережі LoRaWAN досягається внаслідок використання адаптивної швидкості передачі даних та використання багатоканального мультимодемного приймача в шлюзі, що дозволяє приймати одночасно повідомлення по декількох каналах. Мережа використовує цей складний алгоритм швидкості передачі даних для точного налаштування зв'язку між кожним пристроєм та шлюзом, щоб мінімізувати енергоспоживання та максимізувати надійність. Мережі LoRaWAN можуть бути розгорнуті з мінімальною кількістю інфраструктури, і по мірі необхідності можна додавати додаткові шлюзи, підвищуючи швидкість передачі даних, зменшуючи кількість

підслуховуючих пристроїв для інших шлюзів і масштабуючи пропускну здатність.

Мережевий сервер — це інтерфейс між сервером додатків і шлюзами.
[6]

Виконує наступні функції:

- Управління радіомережею. Мережевий сервер мережі LoRaWAN вибирає базову станцію для передачі повідомлень в напрямку "вниз" (downlink), приймає рішення про необхідність зміни швидкості передачі даних для кожного терміналу, потужності передавача, контролює заряд батарей кінцевих пристроїв, шифрує дані й т. д.
- Контроль радіомережі включає моніторинг, збір статистики та аварійне інформування.
- Маршрутизація пакетів даних від абонентських терміналів до відповідних серверів додатків. Кожен пакет даних, що відправляється абонентським терміналом, має у своєму складі унікальний ідентифікатор DevAddr, а на мережевому сервері зберігається запис про відповідність DevAddr і URL сервера додатків, якому призначена інформація від терміналу (датчика). На підставі цієї відповідності мережевий сервер виконує маршрутизацію пакета до сервера додатків, де відбувається його подальша обробка додатком сервіс-провайдера.

Сервер додатків (Application Server) може віддалено контролювати роботу кінцевих вузлів і збирати необхідні дані з них. Крім роботи з даними, сервер додатків може керувати терміналами з рівня програми (наприклад, переводити їх в режим роботи іншого класу, управляти опцією адаптивної передачі даних, мультикаста і т.д.).

В якості сервера додатків найкраще використовувати "хмарні" PaaS платформи, наприклад:

- AWS IoT, хмарна платформа для IoT, заснована Amazon. Ця інфраструктура дозволяє розумним пристроям вільно підключатися та безпечно взаємодіяти з хмарою AWS та іншими під'єднаними пристроями.

- ARM Mbed IoT-платформа для розробки додатків для IoT на основі мікроконтролерів ARM. Мета платформи ARM Mbed IoT-забезпечити масштабоване, підключене та безпечне середовище для пристроїв IoT шляхом інтеграції інструментів та послуг Mbed.

- Microsoft Azure IoT Suite, платформа, яка складається з набору служб, які дозволяють користувачам взаємодіяти та отримувати дані з пристроїв IoT, а ще виконувати різноманітні операції, такі як багатовимірний аналіз, перетворення й агрегування, і візуалізувати ці операції в спосіб, який підходить для бізнесу.

- Brillo/Weave від Google-платформи для швидкого впровадження IoT-додатків. Платформа складається з двох основних магістралей: Brillo, операційної системи на базі Android для розробки вбудованих малопотужних пристроїв; і Weave, IoT-орієнтований протокол зв'язку, який служить мовою зв'язку між пристроєм і хмарою.

- Calvin, Платформа IoT з відкритим кодом, випущена компанією Ericsson, призначена для створення та управління розподіленими додатками, які дозволяють пристроям взаємодіяти один з одним. Calvin включає середовище розробки для розробників додатків, а також середовище виконання для роботи з запущеним додатком.

Мережі LoRaWAN з'єднують тисячі пристроїв, розгорнутих у польових умовах, що підтримують клієнтські програми, та багато з цих пристроїв можуть знаходитись у віддалених або недоступних місцях. При необхідності поновлення пристроїв новими функціями програмного забезпечення або патчами безпеки, можна забезпечити надійне оновлення вбудованого ПЗ за допомогою функцій фрагментації повідомлень, багатоадресної розсилки, прямої

корекції помилок і дельта-функцій. Усі ці функції доступні за допомогою надійного сервера багатоадресної передачі Actility ThingPark (RMC), що підтримує онлайн-оновлення прошивки всіх кінцевих пристроїв «По повітрю» (Firmware Updates Over the Air, FUOTA).

Основні переваги LoRaWAN

Протокол LoRaWAN — це глобальний стандарт, який забезпечує велику дальність (до 15 км в приміському середовищі, та ще більше в сільській місцевості) двонаправленого зв'язку з дуже низьким енергоспоживанням, дозволяючи працювати на одній і тій же батареї до десяти років. LoRaWAN використовується в неліцензованих радіочастотних смугах ISM (промислових, наукових, медичних) для економічно ефективного розгортання мережі. Використання неліцензованого спектра означає, що компанії можуть легко розгортати мережі та створювати приватні мережі для підприємства. Діапазон дуже сильно залежить від навколишнього середовища або перешкод у даному місці, але LoRa і LoRaWAN мають бюджет зв'язку більший, ніж будь-яка інша стандартизована комунікаційна технологія. Бюджет каналу зв'язку, як правило, заданий в децибелах (151 дБ), є основним фактором при визначенні діапазону в даному середовищі.

Вбудована безпека LoRaWAN

LoRaWAN використовує два рівні безпеки: один для мережі та один для програми. Мережева безпека забезпечує автентичність вузла в мережі, тоді як прикладний рівень безпеки програми гарантує, що оператор мережі не має доступу до даних додатків кінцевого користувача. Кожен датчик має унікальний ідентифікатор, який гарантується міжнародним IEEE. У порівнянні з деякими іншими системами, що використовують єдиний ключ для аутентифікації та шифрування, система LoRaWAN розділяє аутентифікацію й шифрування, щоб автентифікувати пакети та забезпечити захист цілісності. Рішення LoRaWAN для базового мережевого сервера підтримує 2 способи аутентифікації й

активації, описаних в специфікації LoRaWAN: активація за допомогою персоналізації (ABP) та активація «по повітрю» (OTAA). [4]

Активація кінцевих пристроїв по повітрю (OTAA) полегшує активацію кінцевих пристроїв у будь-якій мережі, оскільки вони не персоналізовані ні з якою адресою пристрою (DevAddr) та мережевим ключем. Натомість, щоразу, коли кінцевий пристрій приєднується до мережі, для шифрування та перевірки передач на мережевому рівні отримується специфічний, для цього кінцевого пристрою, ключ сеансу мережі. Використання як ключа сеансу мережі, так і ключа сеансу додатка дозволяє використовувати об'єднані мережеві сервери, на яких дані програми не можуть бути прочитані або підроблені мережевим провайдером. [8]

Гнучкість розгортання LoRaWAN

LoRaWAN пропонує велику гнучкість технічних архітектур, дозволяючи реалізувати як суспільні, так і приватні мережі LoRaWAN, створювати руйнівні моделі для розподілу витрат і доходів та ущільнювати мережу там, де це найбільше потрібно, в залежності від потреб додатків Інтернету речей, без обмежень за розміром й обсягом керованих даних. LoRaWAN забезпечує розгортання в соціальній та приватній мережі. Мережа має такі типи:

- Суспільна/соціальна мережа: Оператор інвестує в регіональну або загальнодержавну мережу та продає послуги підключення своїм клієнтам.
- Приватна/корпоративна мережа: корпоративні клієнти встановлюють шлюзи LoRaWAN у приватних приміщеннях, при цьому шлюзами керує оператор, або використовують власну мережеву платформу LoRaWAN, яка особливо адаптована до цільних випадків використання пристроїв, оскільки пропускна здатність мережі та підвищена якість обслуговування можуть бути забезпечені при незначно збільшених витратах. Це стає можливим,

тому що LoRaWAN працює в неліцензованому спектрі, а шлюзи досить недорогі та прості в розгортанні.

- Гібридна мережа: оператор забезпечує покриття по всій країні, але різні зацікавлені сторони, такі як приватні підприємства або приватні особи, допомагають у подальшому ущільненні мережі відповідно до їх потреб у своїх приміщеннях за допомогою керованих мереж. Ця модель забезпечує надійне приватно-державне партнерство при розподілі витрат і доходів.

За допомогою Actility, для підтримки Інтернету речей використовують варіанти з малим і середнім масштабом покриття, локальні приватні мережі можуть бути розгорнуті за двома моделями: локальні або SaaS. Для широкомасштабного покриття рішенням є використання мережевого сервера за моделлю SaaS.

- Місцеві:

Шлюзи LoRa можуть бути встановлені на одному або декількох об'єктах, з одним або декількома мережевими серверами. За наявності декількох шлюзів на одному вузлі, один сервер може централізовано керувати всіма шлюзами LoRaWAN, встановленими там, або на різних віддалених вузлах. Основна перевага даної архітектури полягає в централізованому управлінні всіма об'єктами, завдяки чому можна стандартизувати обмін даними між об'єктами та корпоративним SI. У цьому контексті базова мережа дозволяє створити унікальний інтерфейс між даними, що надходять від підключених об'єктів, і бізнес-додатків. [4]

- SaaS (Програмне забезпечення як послуга):

Дана технічна архітектура пропонує відмовитися від розгортання основної мережі на об'єкті. Вона реагує на більшість випадків використання та виявляється відмінним способом перевірки фаз РОС. Для цього потрібно відкрити сайт в інтернет або налаштувати власний VPN, інтегрований з Activity.

Це популярне рішення для операторів інфраструктури або будівель, які бажають швидко під'єднати свої об'єкти до своїх бізнес-додатків. [4]

Глобальний роумінг LoRaWAN

Глобальний роумінг між різними мережами LoRaWAN дозволить створювати нові моделі використання в різних країнах, і нові бізнес-моделі з більш простим розгортанням. Lora Alliance затвердив і стандартизував архітектуру роумінгу в "LoRaWAN Backend Interfaces 1.0 Specification", щоб забезпечити мережеве співробітництво між різними операторами LoRaWAN. Існує два типи роумінгу для мереж LoRaWAN: пасивний роумінг і роумінг з передачею даних.

- **Пасивний роумінг**

Мережа, яка використовує шлюзи іншої мережі для поліпшення свого покриття, але без передачі управління над своїми кінцевими пристроями. Пасивний роумінг забезпечує бездоганну переадресацію пакетів між 2 мережами операторів для оптимізації пропускної здатності та кращого керування акумулятором пристрою. Окрім збільшення зони покриття, пасивний роумінг дозволив знизити коефіцієнт поширення для збільшення пропускної здатності мережі та підвищити точність геолокації. [8]

- **Роумінг передачі даних**

При такому типі роумінгу домашня мережа передає управління кінцевим пристроєм в іншу мережу. Пристрій відключається від першої мережі та перепідключається до іншої. Домашня мережа може у будь-який момент превентивно відновити контроль над кінцевим пристроєм.

З метою забезпечення глобального роумінгу компанія Actility, лідер в області мережевого підключення з низькою потужністю (LPWA), впровадила ThingPark Exchange, перший міжнародний роумінг-центр IoT, що дозволяє операторам LoRaWAN у всьому світі підписатися на послугу для забезпечення миттєвої переадресації пакетів між їхніми мережами. Thingpark Exchange - це

перша платформа для роумінгу, яка повністю відповідає новим специфікаціям роумінгу LoRa Alliance. Центр ThingPark Exchange дозволяє постачальникам послуг LoRaWAN послідовно виконувати та контролювати свої роумінгові угоди. Політика трафіку та угоди про рівень обслуговування (SLA) можуть налаштовуватися за допомогою індивідуальних комерційних угод.

Приєднавшись до ThingPark Exchange, постачальники послуг можуть легко задовольнити вимоги своїх клієнтів щодо глобальних розгортань. Наприклад, компанії, що працюють в декількох країнах або по всьому світу, можуть укладати контракти лише з одним оператором для підключення IoT, а не з різними операторами в кожній країні. Обраний єдиний оператор, підключений до ThingPark Exchange, може використовувати інших роумінг-партнерів, підключених до ThingPark Exchange, для надання своїм клієнтам рішення про з'єднання між країнами.

ThingPark Exchange також надає доступ до додаткових послуг, таких як ThingPark Activation, що спрощує створення мережі та активацію пристрою. Ця послуга дозволяє виробникам пристроїв надавати свої пристрої на одному сервері Join Server та, таким чином, унікальному AppEUI / JoinEUI, одночасно маючи можливість активувати пристрої в декількох домашніх мережах, підключених через Thingpark Exchange.

LoRaWAN для геолокації

LoRaWAN дозволяє створювати нові геолокаційні рішення на безпрецедентному ціновому рівні, завдяки чому робить наскрізну цифрову логістику реальністю. Геолокація може використовуватися для визначення розташування підключених об'єктів, відстеження їх під час переміщення або створення геозон: надсилання попередження, якщо об'єкт переміщається за межі певної області. Багато додатків можуть скористатися геолокацією — на основі GPS або LoRaWAN, в залежності від вимог.

Мережі LoRaWAN можуть визначати місцеперебування пристроїв без GPS, використовуючи лише сигнали радіозв'язку. Три GPS-синхронізовані базові станції з точною часовою міткою здатні тріангулювати положення будь-якого датчика. Вимірювання різниці в часі після прибуття (TDoA) переводиться в відстань між ними та трьома фіксованими точками, що дозволяє визначити передбачуване місце розташування. Уникнення GPS на пристрої знижує вартість та енергоспоживання. [4]

Геолокація на основі GPS не нова, але LoRaWAN робить його більш рентабельним та універсальним.

Двонаправлений зв'язок LoRaWAN з вбудованим GPS-чіпом забезпечує надзвичайно тривалий термін служби акумулятора (в 10 разів більше стільникового), дозволяючи датчикам працювати протягом декількох тижнів або місяців між зарядами. Застосування GPS-трекерів було обмежено коротким терміном служби акумулятора (або непомірно високою вартістю батареї), а також високою платою за зв'язок (більше їх не використовують). Використання LoRaWAN як комунікаційної технології на відміну від GPRS або навіть новіших варіантів 3GPP, таких як NB-IoT, скорочує бюджет на електроенергію більш ніж на порядок.

Програми LoRaWAN

Технологія LoRaWA була розроблена для використання в випадках, коли датчик передає невеликі обсяги даних кілька разів на день. Вона добре підходить для розумних лічильників, трекерів, датчиків навколишнього середовища тощо. Вона не призначена для підтримки додатків, які вимагають високої швидкості передачі даних, таких як аудіо чи відео. Однак LoRaWAN можна використовувати для управління іншими можливостями бездротового пристрою; наприклад, віддалено доручити камері розпочати передачу даних і залишатися в режимі низької потужності, коли відкриття відеопотоку не потрібно.

Мережі LoRaWAN надають широкий спектр вертикальних рішень, дозволяючи постачальникам послуг використовувати одну платформу й стандарт для управління різними випадками використання, такі як:

- Енергетика та комунальні послуги: автоматичне зчитування показань лічильників води, газу та електроенергії.
- «Розумні міста»: розумні парковки (моніторинг доступності паркувальних місць), освітлення (віддалене управління, контроль стану) та моніторинг смітєвих баків (оптимізація процесів утилізації сміття).
- Smart Industries: моніторинг виробничого обладнання (зменшення простою, контроль параметрів, забезпечення безпеки персоналу); контроль стану контейнерів на виробництві (нафтохімічні виробництва, контейнери для відходів виробництва, контейнери з небезпечними речовинами); забезпечення безпеки на залізниці; внутрішній моніторинг навколишнього середовища в аеропортах; моніторинг автотранспорту та вантажів на певній території (визначення місця розташування, інформація про стан транспортних засобів і вантажів); моніторинг рівня рідини та витрати нафти та газу; збір даних про стан навколишнього середовища (забруднення, шум, дощ, вітер і ін.); контроль наявності шкідливих речовин в атмосфері.
- Управління будівлями та спорудами: енергоефективність та виявлення витоків води.
- Логістика та ланцюг постачання: глобальне відстеження активів та моніторинг товарів.
- Точне сільське господарство: розумне зрошення, управління врожаєм та моніторинг великої рогатої худоби.

- Споживчий IoT: витратні матеріали, моніторинг будинку і відстеження споживачів

LoRaWAN в просторі IoT

У просторі IoT спостерігається велика активність, порівнюючи варіанти LPWAN як з технічної точки зору, так і з точки зору бізнес-моделі. Мережі LPWAN розгортаються зараз, оскільки існує сильне економічне обґрунтування для підтримки негайного розгортання, а витрати на розгортання мережі в неліцензійних діапазонах вимагають значно меншого капіталу, ніж навіть оновлення програмного забезпечення 3G.

Значна частина з'єднань надходить від стаціонарних та ближніх ліній зв'язку, таких як Wifi, Bluetooth, Zigbee, Z-Wave тощо (рис.1.12). Ці технології добре підходять для застосування на коротких відстанях, де споживання електроенергії та час автономної роботи не є серйозною проблемою. Нове сімейство бездротових підключень IoT під назвою "LPWA" добре підходить для підтримки служб та випадків використання, для яких потрібна комунікація на великій відстані (десятки км), щоб дістатись до пристроїв, які повинні мати бюджет низького енергоспоживання, щоб працювати кілька років віддалено на одному акумуляторі. LoRaWAN є мережевим рішенням LPWA, яке в даний час набирає найбільшу популярність для підтримки IoT-додатків та служб, але також є Sigfox, що використовує технологію модуляції ультравузької смуги (UNB) та стандарти 3GPP (Cellular Networks), такі як LTE-M та NB- IoT. [4]

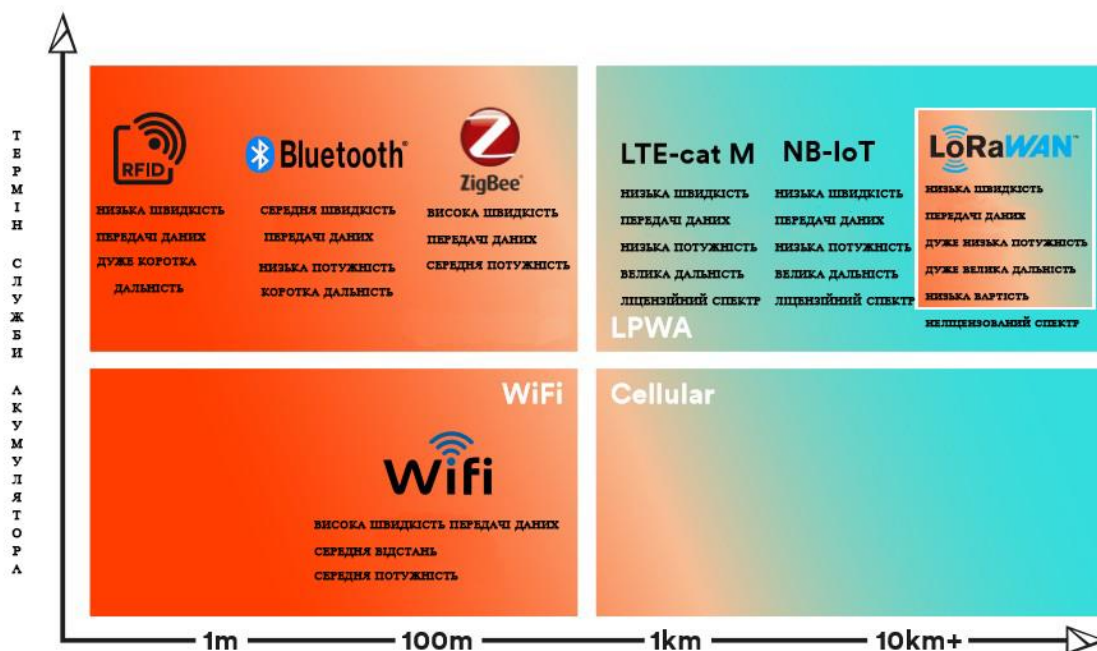


Рис. 1.12 Порівняння бездротових технологій

Для багатьох вимог LPWAN потребує найнижчої вартості та меншої потужності. У реальних умовах експлуатації (близько 20 повідомлень на день) споживання електроенергії LoRAWAN в 5 разів краще, ніж у LTE Cat NB1). Піковий струм в 10 разів менше, що на порядок зменшує розмір батареї і її вартість протягом десятирічного терміну служби.

LoRaWAN та Mobile IoT представляють різні сегменти ринку. LoRa обслуговує велику кількість пристроїв з низькою вартістю, низьким енергоспоживанням та найнижчою швидкістю передачі даних, а потім NB-IoT, а потім LTE-M, які більш адаптовані до таких додатків, як підключені машини, телематика, до яких пред'являються середні вимоги по швидкості передачі даних. Поєднання LoRaWAN та Mobile IoT (LTE Cat-NB1, LTE Cat-M1) вирішує потреби всіх випадків використання IoT, роблячи їх додатковими.

Інша основна відмінність LoRaWAN від 3GPP полягає у використанні неліцензованого спектра. LoRaWAN дозволяє легко розгортати "кампусні"

мережі з тисячами пристроїв на невеликій території (розумне місто, розумна будівля, розумний аеропорт, розумна фабрика). Корпоративні мережі можуть бути повністю під контролем замовника, і дані залишаються зашифрованими від початку до кінця.

Чому потрібно вибирати LoRaWAN?

Мережі LoRaWAN не потребують ліцензування. Пристроєм не потрібні SIM-карти.

Обладнання в мережі LoRaWAN працює за принципом асинхронної передачі. Якщо пристроєм є, що передавати, то вони «прокидаються». В інший час пристрої "сплять" і економлять заряд батареї.

Пристрої LoRa можуть підтримувати двосторонній зв'язок, а не просто працювати на передачу даних.

Мережа LoRaWAN добре захищена, оскільки використовує два рівні безпеки. Один рівень безпеки залучений для мережі, а інший використовується додатком. Також малопотужні сигнали в лінійно-частотній модуляції важко виявити та перехопити.

Пристрої в мережі LoRaWAN, які не підключені до супутникової навігації, можуть повідомляти про своє приблизне місцеперебування. Тільки потрібна передача даних на декілька шлюзів. Розрахунок розташування буде вестися за часом від відправки та отримання повідомлення.

1.2.3 Технологія SIGFOX

Бездротова технологія Sigfox - одна з найбільш відомих технологій енергоефективної мережі далекого радіусу дії (LPWAN) на ринку.

Технологія Sigfox підтримується і сертифікується французькою фірмою Sigfox Societe Anonyme. Ця ж фірма є ексклюзивним виробником базових станцій Sigfox. Технологія розроблена французьким інженером Крістофом

Фауртетом в 2009 році й відповідає специфікаціям ETSI для класів технології мереж з низькою пропускнуою здатністю і технології з ультравузькою смугою модуляції. [11]

Мережа відмінно підходить для простих і автономних пристроїв, які надсилають невелику кількість даних в цю мережу. Архітектура мережі SIGFOX досить сильно схожа на стільникову інфраструктуру (GSM- і GPRS-3G-4G), але являється більш енергоефективною і в той самий час менш витратною. [12]

Мережа працює в існуючих неліцензованих діапазонах (ISM) в глобальному масштабі й співіснує в цих частотах з іншими радіотехнологіями без проблеми перекриття мережі або проблеми пропускнуої здатності.

Політика SigFox має на увазі надання відкритої інформації про необхідне апаратне забезпечення (базові станції й модулі) для побудови мережі, при цьому програмне забезпечення є закритим і продається операторам як послуга. В даний час SigFox присутній в більш ніж 60 країнах. [11]

Технічні характеристики:

- радіус дії мережі SIGFOX становить близько 30-50 км в сільській місцевості та в міських районах. Зазвичай, в містах де багато шумів, діапазон роботи від 3 до 10 км;
- термін служби пристроїв без заміни батареї: 20 років від 2-х батарейок типу AA;
- використовувані частоти: 868 МГц (Європа) і 902 МГц (США);
- топологія мережі: зірка (базова станція, до якої підключаються кінцеві точки).

Структура SIGFOX (рис. 1.13), що нагадує стандартні мережі стільникового зв'язку, містить асинхронні і синхронні мобільні пристрої, базові станції, шлюзи для виходу в 3G-мережі, дата-центри, системи повідомних повідомлень, пристрої віддаленого контролю. [12]

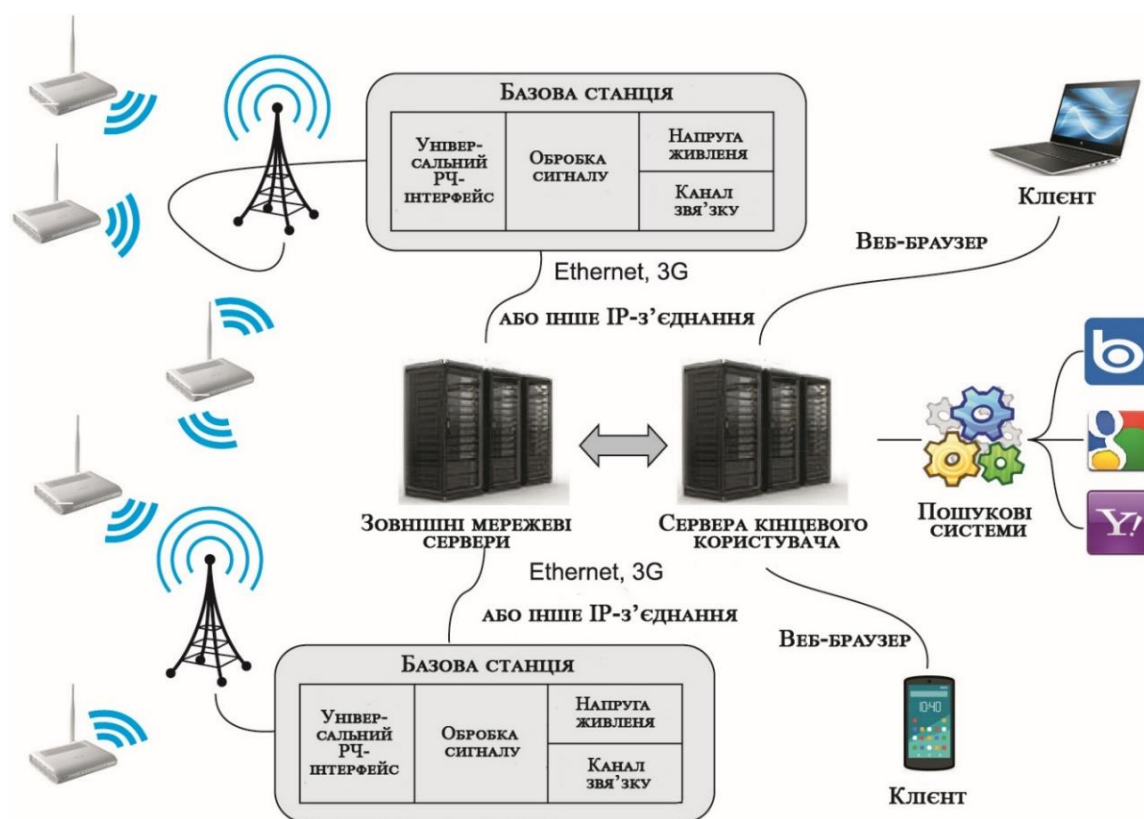


Рис. 1.13 Структура SIGFOX

Технологія SIGFOX базується на чотирьох основних принципах: розширення спектра, бездротова технологія малої потужності з ультравузькою смугою, програмно-обумовлена радіосистема і когнітивне радіо.

SigFox — це односкачкова радіальна, або, як її ще називають, зіркоподібна мережа зі шлюзами, які служать контролерами цієї мережі. Подібно LoRa, SigFox має великий діапазон покриття і їй властиво низьке енергоспоживання. Але якщо розглядати SigFox як радіоканал для передачі даних, то вона радикально відрізняється від LoRa. Для передачі даних SigFox використовує ультравузьку смугу частот з двійково-фазовою маніпуляцією (BPSK), а для кодування даних змінює фазу несучої радіохвилі. Стрибкоподібна перебудова частоти, повтор кадрів і можливість зв'язку з декількома базовими станціями роблять цю технологію дуже стійкою до перешкод. Для технології Sigfox застосовується схема радіодоступу, яка забезпечує можливість зв'язку за

допомогою використання промислових, наукових і медичних радіодіапазонів. В Європі для розгортання з пропускнуою здатністю 100 Гц по висхідній лінії зв'язку використовується спектр шириною 192 кГц на частоті 868 МГц. Для забезпечення виключно низького енергоспоживання зв'язок з пристроєм можливий тільки під час коротких періодів часу, наприклад, коли пристрій включає свій приймач після відправки повідомлення.

Трансивери SDR повинні працювати з максимально можливою кількістю різних радіостандартів, в широкому діапазоні частот з різними принципами модуляції й кодування. У таких пристроях гранично спрощена аналогова частина, а всі завдання по декодуванню й обробці сигналів покладені на програмне забезпечення. Таким чином, в пристроях Sigfox на програмному рівні реалізовані функції, які в традиційних схемах виконують апаратні компоненти — конвертери, фільтри, підсилювачі, модулятори/демодулятори й т. д.

Метод когнітивного радіо визначає систему управління, яка має відношення до процесу аналізу інформації, необхідної для вирішення певної задачі, — наприклад, пошуку в складному широкосмуговому радіочастотному спектрі сигналів певної частоти й модуляції.

Мобільні пристрої SIGFOX можуть передавати інформацію в дата-центри аналогічно тому, як в мережах стільникового зв'язку абоненти передають короткі повідомлення один одному на сервер, використовуючи мережі певного провайдера. Базові станції передають дані на сервери SIGFOX через логічні канали зв'язку. Кожне повідомлення відсилається з ідентифікаційним ключем, прив'язаним до мобільного пристрою.

Інформація від мобільного пристрою до базової станції SIGFOX передається у вигляді трьох пакетів на трьох псевдовипадкових частотах. Пріоритет віддається передачам від мобільного пристрою до базової станції (UL). Сеанси передачі у зворотному напрямку (DL) застосовуються значно рідше. Так, кращі зразки мобільних пристроїв SIGFOX дозволяють передавати

до 140 повідомлень по 12 байт кожне в напрямку UL, але не більше чотирьох повідомлень по 8 байт в напрямку DL. При цьому кожне повідомлення пересилається тричі на різних частотах, що дозволяє досягти високого ступеня надійності передачі даних.

Технологія SIGFOX строго не регламентує як конструкцію, так і параметри мобільного пристрою. Тому виробники мають право створювати власні варіанти.

Слід зазначити, що простота конструкції й невелика ціна призвели до того, що мобільні пристрої SIGFOX мають істотне обмеження по чутливості — вони починають стійко працювати тільки якщо корисний сигнал перевищує рівень шумів приблизно на 20 дБ. У структурі SIGFOX немає етапів ініціалізації зв'язку та параметризації мобільного пристрою, який самостійно вирішує, коли йому потрібно передати відповідне повідомлення. Основну частину часу (понад 99%) мобільний пристрій SIGFOX знаходиться в сплячому режимі й виходить на зв'язок лише за заданим графіком. Крім того, мобільний пристрій може запитувати мережу з проханням про перезавантаження. Якщо мережа не відповість протягом 20 с, пристрій перейде в режим очікування повідомлення на заданій частоті.

В даний час компоненти для мобільних пристроїв SIGFOX випускають провідні світові виробники, зокрема Atmel, ON Semiconductor, Silicon Labs, Telecom Design, Telit, StickNTrack та інші. [12] На базі цих чіпів відомі світові виробники випускають готові до роботи модулі Sigfox, доповнені сучасними мікроконтролерами й вбудованим програмним забезпеченням — наприклад, модуль Telit та інші.

В архітектурі Sigfox використовуються власні базові станції. Основна ідея середовища Sigfox полягає в тому, щоб покласти на базову станцію всі основні функції з обслуговування простого мобільного пристрою. У технології Sigfox програмне забезпечення базової станції служить головним елементом системи й

практично повністю забезпечує обробку даних, отриманих з мобільних пристроїв. Далі повідомлення надсилається кінцевому користувачеві через відповідного оператора.

Ліцензія на виготовлення та експлуатацію базових станцій Sigfox належить французькій фірмі Sigfox Société Anonyme. Одна з останніх моделей цього типу обладнання SIGFOX SBS-T-902 v2.2 являє собою досить складний програмно-апаратний комплекс. Ця базова станція, крім прийому й обробки сигналів мобільних пристроїв, може передавати керуючі повідомлення мережі SIGFOX.

У SIGFOX вузли можуть використовуватися у двох конфігураціях:

- Режим point-to-point (P2P) – прямий зв'язок між вузлами (Інтерфейс LAN);
- Гібридний режим - SIGFOX / P2P (P2P + GW в мережі SIGFOX).

У режимі point-to-point (P2P), вузли можуть підключатися безпосередньо між ними й відразу відправляти повідомлення, при цьому відправлення буде безкоштовне, оскільки передача даних відбувається без транзитного каналу, за який треба платити. Це корисно, бо можна створити вторинні мережі в будь-який час і нема потреби міняти прошивку, достатньо тільки використовувати спеціальні команди поточної бібліотеки.

У гібридному режимі використовується поєднання SIGFOX і P2P режимів, що дозволяють відправляти тільки певні повідомлення через мережу. В цьому випадку використовується один вузол в якості шлюзу мережі (режим P2P + SIGFOX), а інші вузли в режимі P2P.

Технологія використовує шифрування AES з HMACs з закритим ключем, який вбудований в прилад, та має деякий порядковий номер. [12]

Технологія SIGFOX спрямована на низьку вартість пристроїв, де потрібна широка зона покриття. Існує безліч додатків, яким необхідна ця технологія бездротового зв'язку. Галузі, де можуть бути використані мережі SIGFOX:

- будинок та промислові товари;
- комунікації в атомній енергетиці;
- транспорт (включаючи в себе технічне управління);
- віддалений моніторинг;
- роздрібна торгівля.

Стандарт має переваги у порівнянні з іншими базовими технологіями LPWAN мереж.

- велике просторове охоплення;
- висока проникаюча здатність;
- до 20 років роботи сенсора від 2-х батарей AA;
- наднизьке споживання енергії;
- доступна ціна.

Як і всі сучасні технології, мережа SIGFOX, має і негативні характеристики:

- низька швидкість передачі даних;
- залежність від стільникової інфраструктури;
- обмежена завадостійкість.

В даний час технологія охоплює Францію, Іспанію, багато міст Великобританії, Нідерландів, Бельгії, Португалії, Ірландії, Люксембурзі, багато великих європейських міст, і деякі міста в США, Австралії, Новій Зеландії. SIGFOX мережі планується впроваджувати в 60 країнах протягом наступних п'яти років. [11] У Сполучених Штатах, в Сан-Франциско, Кремнієвій долині, і інших ключових місцях реалізуються і пілотні проекти, які будуть наступним великим ринком мережевих технологій SIGFOX.

1.2.4 Технологія NB-IoT

NB-IoT (вузькосмуговий інтернет речей) – це стандарт стільникового зв'язку для пристроїв телеметрії, заснований на LTE і передбачає передачу невеликих обсягів даних. [13] Він був створений в процесі роботи над стандартами стільникових мереж нового покоління заснованим в 1998 році консорціумом 3GPP. Технологія NB-IoT є частиною ініціативи мобільного "Інтернету речей" компанії GSMA, спрямованої на те, щоб надати користувачам недорогі лінії зв'язку з низьким енергоспоживанням для IoT-мереж із застосуванням стандартів стільникового зв'язку.

Архітектура NB-IoT

NB-IoT відноситься до стандарту LPWA, призначеного для M2M додатків, які вимагають низькошвидкісної передачі даних і роботи в автоматичному режимі протягом тривалого періоду часу, в тому числі у віддалених або важкодоступних місцях. [14]

Найголовніша особливість: NB-IoT – це окрема існуюча «гілка» на базі відомої технології LTE. Це саме частина ієрархії LTE-мереж, але зі своїми особливостями.

Технологія NB-IoT багато успадкувала від LTE, починаючи з фізичної структури радіосигналу і закінчуючи архітектурою самої мережі. Вона створювалася з метою на застосування в умовах більш низького рівня сигналу і більш високого рівня шумів з урахуванням економії ресурсу батареї. Особливість NB-IoT в тому, що вона здатна передавати невеликі повідомлення від різних датчиків і приладів, тобто передача відео або аудіо в цьому випадку не застосовується. [16]

У LTE застосовується принцип поділу каналів OFDM, що означає мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів. Є два напрямки взаємодії: Downlink - напрямок від базової станції і Uplink - напрямок

до базової станції. Ці канали поділяються на піднесучі по 15 кГц. OFDMA використовується для напрямку від базової станції, а SC-FDMA – для напрямку до базової станції. [15]

В LTE несуча розділена на ресурсні блоки, які розділені на 12 піднесучих. Загальна ширина займаної смуги: 180 кГц. Додатково кожен ресурсний блок має 7 таймслотів по 0,5 мс, разом - 84 ресурсних елементів (RE) (рис. 1.14).

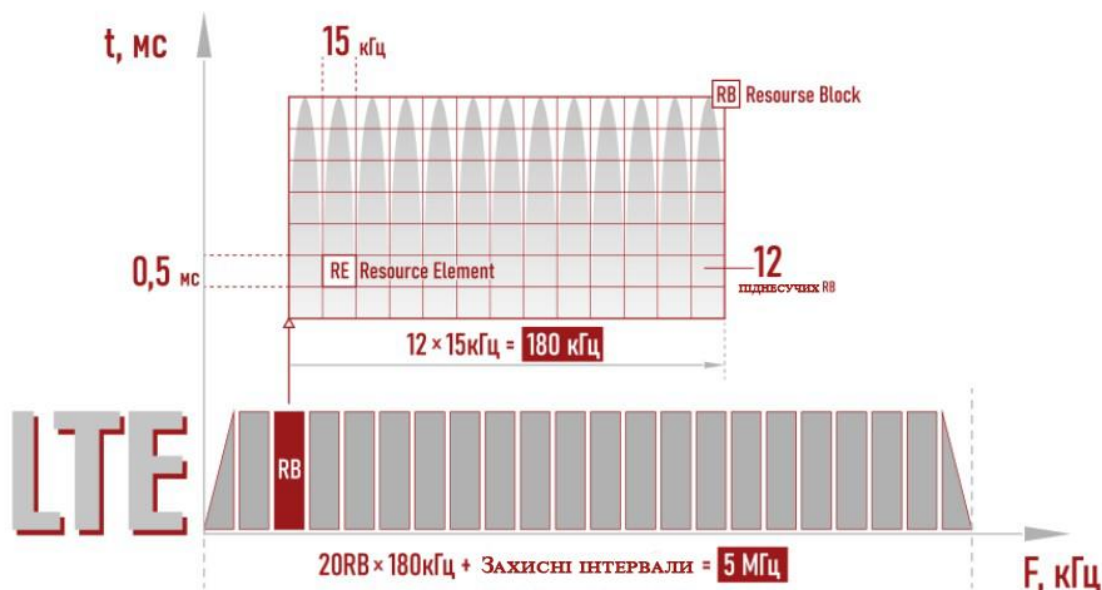


Рис. 1.14 Мережева архітектура NB-IoT

Також вже стандартизовано поділ ресурсних блоків на 48 ресурсних елементів по 3.75 кГц в напрямку від базової станції, це розширює таймслот до 2 мс.

Для досягнення більшої пропускної здатності застосовуються додаткові технології (QAM256, QAM64 і ін.), Адже LTE - це швидкісний стандарт.

У зв'язку з обмеженою потужністю абонентських пристроїв NB-IoT до 23дБм передача сигналу у вузькій смузі 15 кГц дозволяє значно збільшити спектральну щільність сигналу. Відповідно, співвідношення СИГНАЛ / ШУМ буде найбільш ефективним в NB-IoT в порівнянні з GSM. [13]

Додатково можливе формування ресурсного юніта з різних варіацій використання ресурсних елементів (RE). З ресурсного юніта формуються так звані транспортні блоки, що призначаються користувачеві.

В одному транспортному блоці може бути від 1 до 10 ресурсного юніта. Попри зміні якості сигналу NB-IoT може містити в собі різну кількість корисної інформації.

Можливості NB-IoT

Для технології NB-IoT визначили обмежені характеристики, щоб можна було використовувати її на базі вже існуючих стільникових мереж.

- NB-IoT обмежений загальною смугою 1-го ресурсного блоку, який має ширину 180 кГц.
- Радіотракт пристрою, що використовує NB-IoT, має у своєму розпорядженні тільки одну антену.
- Передача і прийом рознесені за часом (напівдуплекс).
- Можливість передавати дані у напрямку Uplink на одній піднесучій.
- Обмежені типи модуляцій, використовуються BPSK і QPSK.
- Можуть застосовуватися переповтори переданого сигналу.

Відповідно, застосування таких обмежень і було покликане скоротити накладні витрати на споживання енергії, розміри й, звичайно, ціну пристрою.

Хочеться виділити важливу особливість технології NB-IoT, саме переповтори переданого сигналу. Це не повторна передача пакета при помилці його прийому, це функціонал прийняття рішення про успішність прийнятого сигналу. Рішення відбувається тільки після прийому всіх повторених повідомлень.

Еталоном для мережі NB-IoT визначені три рівні. Кількість повторів може задаватися індивідуально в широких межах.

Стандарт NB-IoT може бути реалізований в трьох різних режимах роботи:

1. Stand Alone - використання несучої стандартної технології GSM для смуги NB-IoT (рис.1.15).

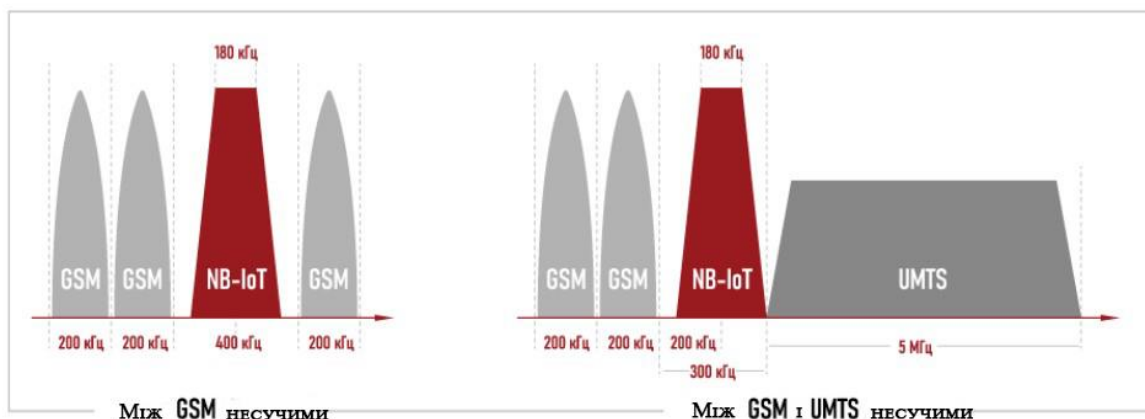


Рис. 1.15 Варіанти розміщення NB-IoT в режимі Stand - Alone.

2. Guard Band - в якості робочого діапазону використовується захисний інтервал стандартного варіанту технології LTE (рис.1.16).

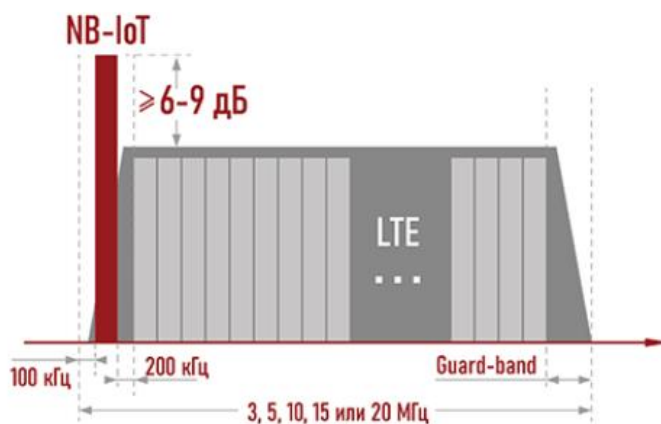


Рис. 1.16 Розміщення NB-IoT в режимі Guard Band

3. In Band - робоча смуга частот знаходиться всередині дозволеного спектру стандартного варіанту технології LTE (рис.1.17).

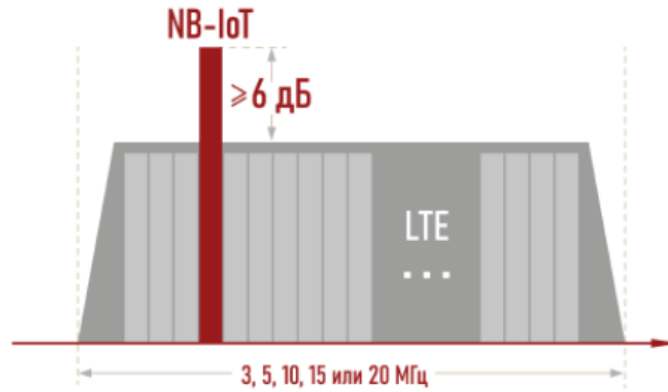


Рис. 1.17 Розміщення Nb-IoT в режимі in Band

Швидкість NB-IoT

NB-IoT багато успадкувала від LTE (вважається швидкісною технологією). IoT пристрої позиціонуються як компактні, енергоефективні й автономні, відповідно, відправлення повідомлень буде відбуватися нечасто і невеликими обсягами. Обсяг переданих даних в цих повідомленнях також істотно малий.

Швидкість – це розрахункове значення. NB-IoT пристрій не може зайняти увесь доступний частотний ресурс. Інша частина розподіляється на інші пристрої, і вона буде дуже залежати від налаштувань мобільного оператора. За підсумком для напрямку від базової станції швидкість буде десь на рівні 25.1 Кбіт / с, а для напрямку до базової станції на рівні 22.1 Кбіт/с в single-tone і 58.8 Кбіт/с для multi-tone. [14]

В Release 14 3GPP, згідно збільшеним розмірам транспортних блоків, для напрямку від базової станції й до базової станції швидкість може перевищити 100 Кбіт/с. [14]

Стандарти NB-IoT

Все вищеописане можна віднести до основ становлення стандарту NB-IoT, який був розроблений консорціумом 3GPP.

Першим документом, в якому стандарт отримав відображення, став Release 13. Release 14 – це подальший розвиток технології. Роботи по проекту Release 14 були завершені в червні 2017 року. Декілька виробників вже випускають модемні модулі й пристрої на базі даного стандарту.

Інша назва технології NB-IoT, що зустрічається в англomовній літературі, - LTE Cat NB1. Відповідно, в документі Release 14 також змінилася і назва – LTE Cat NB2.

Зміни в Release 14 в порівнянні з Release 13:

- Додано третій клас потужності мобільного пристрою: 14 дБм. У Release 13 два класи потужності: 23 дБм і 20 дБм.
- Введено новий механізм перемикавання в режим PSM.
- Прийняті нові алгоритми обчислення координат об'єктів на основі Observed Time Difference Of Arrival і PRS.
- Вводиться новий механізм геолокації - LCS, який використовує технологію OTDOA, вперше регламентовану в Release 9 для мереж LTE.
- Додані модернізовані опорні сигнали позиціонування. Їх введення допомагає відстежувати рух на великих швидкостях в умовах сильних перешкод.
- Поліпшено швидкісні параметри обміну даними.

Нові властивості та функції:

- подвійний запит HARQ (гібридний автоматичний запит на повторну передачу даних);
- підтримка механізму позиціонування (UTDOA / OTDOA);
- новий механізм перемикавання в енергозберігаючий режим;
- можливість використання пристроїв більш низького класу потужності;

- модернізована несуча;
- багатоадресна розсилка;
- нові частотні діапазони (B11, B25, B31, B70).

Сфери застосування пристроїв на базі технології передачі NB-IoT

Основні сфери й галузі, в яких вже застосовується технологія для передачі даних NB-IoT, тепер наступні:

- Енергетика і комунальні господарства.
- Автомобільна промисловість і логістика.
- Шерінг транспортних засобів.
- Розумний будинок.
- Медицина й електронна охорона здоров'я.
- Сільське господарство й агропромисловість.
- Роздрібна торгівля.
- Автоматизація в нафтогазовій галузі.

Застосування нового типу пристроїв або переведення поточних на нові стандарти зв'язку позитивно позначаються на зростанні галузей. Реалізуються пілотні проекти, вже заплановані масові впровадження пристроїв на базі технології NB-IoT в регіонах і великих містах.

Наприклад, у сфері енергетики та комунального господарства NB-IoT застосовується для організації віддаленого збору показань, контролю і навіть управління різними системами. Наприклад, збір і передача показань квартирних лічильників або моніторинг тиску, реагування та оповіщення при позаштатних ситуаціях.

У сфері виробництва NB-IoT застосовується для організації засобів зв'язку в системах забезпечення безпеки в приміщеннях (різні кнопки, датчики, системи оповіщень), системах контролю клімату у виробничих приміщеннях, системах виявлення протікання рідин і газів.

Технологія бездротового стільникового зв'язку NB-IoT виглядає найбільш універсальною, мобільною і відносно дешевою для використання в різних галузях. Широкий спектр сфер застосування охоплює величезний ринок для розробників і постачальників пристроїв, а вже розгорнуті мережі NB-IoT дозволяють швидко інтегрувати пристрої в нові або вже існуючі системи, без необхідності побудови власної інфраструктури, що істотно економить витрати.

Адаптована мережа і спеціальні модемні модулі працюють з високим ступенем енергоефективності для автономних пристроїв і тим самим забезпечують собі провідні позиції в порівнянні з аналогічними GSM/GPRS пристроями.

Виходячи з усіх перерахованих вище особливостей, технологія NB-IoT має істотну перевагу серед інших LPWA технологій і підтримується найбільшими компаніями на ринку бездротового зв'язку.

1.3 Технічні відмінності : SIGFOX, LoRa та NB-IoT

Таблиця 1.2

Огляд технологій LPWAN: Sigfox, LoRa та NB-IoT

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Метод модуляції	BPSK	CSS	QPSK
Частота	Неліцензовані діапазони ISM (868 МГц у Європі, 915 МГц у Північній Америці та 433 МГц в Азії)	Неліцензовані діапазони ISM (868 МГц у Європі, 915 МГц у Північній Америці та 433 МГц в Азії)	Ліцензовані діапазони частот LTE

Продовження таблиці 1.2

Пропускна здатність	100 Гц	250 кГц і 125кГц	200 кГц
Максимальна швидкість передачі даних	100 кбіт/с	50 кбіт/с	200 кбіт/с
Двонаправлений зв'язок	Обмежений / Напівдуплекс	Так / Напівдуплекс	Так / Напівдуплекс
Максимум повідомлень на день	140 (UL), 4 (DL)	Необмежено	Необмежено
Максимальна тривалість корисного навантаження	12 байт (UL), 8 байт (DL)	243 байти	1600 байт
Дальність	10 км (міський), 40 км (сільський)	5 км (міський), 20 км (сільський)	1 км (міський), 10 км (сільський)
Аутентифікація та шифрування	Не підтримується	Так (AES 128b)	Так (AES 128b)
Адаптивна швидкість передачі даних	Ні	Так	Ні
Дозвіл на приватну мережу	Ні	Так	Ні
Стандартизація	Компанія Sigfox співпрацює з ETSI	LoRa-Alliance	3GPP

1.4 Порівняння за показниками коефіцієнтів IoT

При виборі відповідної технології LPWAN для програми IoT слід враховувати безліч факторів, включаючи якість обслуговування, час автономної роботи, затримку, масштабованість, тривалість корисного навантаження, зону покриття, дальність дії, розгортання та вартість. Нижче наведено порівняння Sigfox, LoRa та NB-IoT з точки зору цих факторів та їх технічних відмінностей.

1.4.1 Якість обслуговування

Sigfox та LoRa використовують неліцензовані спектри та асинхронні протоколи зв'язку. Вони можуть відображати завади, багатопроменеве поширення та згасання. Однак вони не можуть запропонувати той самий QoS, який надає NB-IoT. NB-IoT використовує ліцензований спектр та синхронний протокол на основі LTE, які є оптимальними для QoS внаслідок вартості, тобто ліцензовані аукціони LTE-спектру становлять понад 500 мільйонів євро на МГц. Завдяки QoS та зниженню витрат, NB-IoT вважається кращим для додатків, які вимагають гарантованої якості обслуговування, тоді як програми, що не мають цього обмеження, повинні вибирати LoRa або Sigfox.

1.4.2 Термін служби акумулятора та затримка

У Sigfox, LoRa та NB-IoT кінцеві пристрої більшу частину часу перебувають у сплячому режимі, що скорочує кількість споживаної енергії, тобто збільшує термін служби кінцевих пристроїв. Однак кінцеві пристрої NB-IoT споживають додаткову енергію внаслідок синхронного зв'язку та обробки QoS, а режими доступу OFDM / FDMA вимагають більшого пікового струму.

Таке додаткове споживання енергії скорочує термін експлуатації кінцевого пристрою NB-IoT у порівнянні з Sigfox та LoRa. [7]

Однак NB-IoT пропонує перевагу низької затримки. На відміну від Sigfox, LoRa має клас C, що дозволяє обробляти низьку двонаправлену затримку внаслідок збільшення енергоспоживання. Тому для додатків, які нечутливі до затримки та не мають великого обсягу даних для відправки, Sigfox та LoRa класу A є кращими варіантами. Для додатків, які потребують низької затримки, кращий вибір - NB-IoT та LoRa класу C.

1.4.3 Масштабованість та тривалість корисного навантаження

Підтримка величезної кількості пристроїв є однією з ключових особливостей Sigfox, LoRa та NB-IoT. Ці технології добре працюють зі збільшенням кількості та щільності підключених пристроїв. Для вирішення завдання масштабованості необхідно використовувати кілька технологій, таких як ефективне використання різноманітності в каналі, а також у часі та просторі. Однак NB-IoT пропонує перевагу дуже високої масштабованості, ніж Sigfox та LoRa. NB-IoT дозволяє підключати до 100 К кінцевих пристроїв на клітинку у порівнянні з 50 К на клітинку для Sigfox та LoRa. [10]

Однак, NB-IoT також пропонує перевагу максимальної тривалості корисного навантаження. Як представлено в таблиці 1, NB-IoT дозволяє передавати дані розміром до 1600 байт. LoRa дозволяє надсилати максимум 243 байти даних. Sigfox пропонує найменшу тривалість корисного навантаження в 12 байт, що обмежує його використання в різних додатках IoT, яким потрібно надсилати великі розміри даних.

1.4.4 Покриття мережі та діапазон

Основна перевага використання Sigfox полягає в тому, що ціле місто може бути охоплене однією базовою станцією (тобто радіус дії > 40 км). У Бельгії, країні загальною площею приблизно $30\,500\text{ км}^2$, розгортання мережі Sigfox охоплює всю країну тільки з сімома базовими станціями. [7]

На відміну від цього, LoRa має менший радіус дії (тобто діапазон <20 км), який вимагає лише три базові станції для покриття цілого міста, такого як Барселона. NB-IoT має найменшу дальність і можливість покриття (тобто діапазон <10 км). Основна увага приділяється класу пристроїв, які встановлюються в місцях, віддалених від типової досяжності стільникових мереж (наприклад, глибоко всередині приміщень). Крім того, розгортання NB-IoT обмежено базовими станціями LTE. Таким чином, він не підходить для сільських або приміських регіонів, які не користуються послугами LTE.

1.4.5 Модель розгортання

Специфікації NB-IoT були опубліковані в червні 2016 року; таким чином, буде потрібен додатковий час для створення мережі. Однак екосистеми Sigfox та LoRa дозріли й зараз знаходяться в стадії комерціалізації в різних країнах та містах. Проте, розгортання LoRa та Sigfox у всьому світі все ще знаходяться на стадії впровадження.

Крім того, однією суттєвою перевагою екосистеми LoRa є її гнучкість. На відміну від Sigfox та NB-IoT, LoRa пропонує розгортання локальної мережі, тобто локальної мережі з використанням шлюзу LoRa, а також функціонування загальнодоступної мережі через базові станції. У промисловій галузі гібридна операційна модель може бути використана для розгортання локальної мережі

LoRa у заводських районах і використання загальнодоступної мережі LoRa для покриття зовнішніх областей.

1.4.6 Вартість

Необхідно враховувати різні аспекти витрат, такі як вартість спектру (ліцензія), вартість мережі / розгортання та вартість пристрою. У таблиці 1.3 наведено вартість Sigfox, LoRa та NB-IoT. Очевидно, що Sigfox і LoRa є більш економічними в порівнянні з NB-IoT.

Підсумовуючи, кожен з Sigfox, LoRa та NB-IoT має свої переваги щодо різних коефіцієнтів IoT, як показано на рис. 1.18.

Таблиця 1.3

Різні витрати на Sigfox, LoRa та NB-IoT

	Вартість спектру	Вартість розгортання	Вартість кінцевого пристрою
Sigfox	Безкоштовно	> 4000 € / базова станція	<2 €
LoRa	Безкоштовно	> 100 € / шлюз > 1000 € / базова станція	3–5 €
NB-IoT	> 500 М € / МГц	> 15 000 € / базова станція	> 20 €

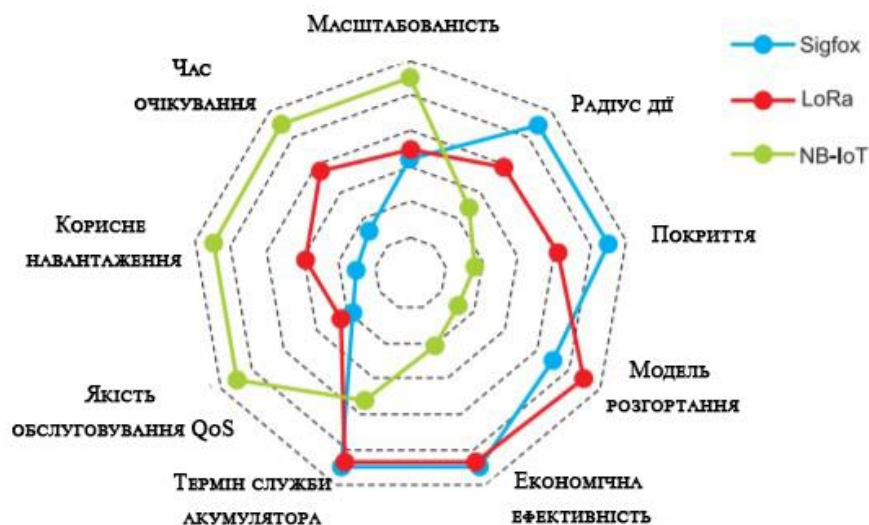


Рис. 1.18 Відповідні переваги Sigfox, LoRa та NB-IoT щодо факторів IoT

1.5 Приклади застосування: яка технологія найкраще підходить?

Фактори IoT та технічні відмінності Sigfox, LoRa та NB-IoT визначатимуть їхню можливість для конкретних застосувань. Одна технологія не може однаково обслуговувати всі програми IoT. У цьому розділі розглядаються різні варіанти використання додатків із підсумком найкращої технології.

1.5.1 Електролічильники

На ринку електролічильників компанії, як правило, вимагають частого спілкування, низької затримки та високої швидкості передачі даних. Зазвичай вони не потребують ні низького споживання енергії, ні тривалого часу автономної роботи, оскільки електролічильники мають постійне джерело живлення. Більше того, компаніям потрібен моніторинг мережі в режимі реального часу для прийняття негайних рішень, наприклад, про завантаження, відключення та перебої. Таким чином, Sigfox не підходить для цього додатка,

оскільки він не обробляє низьку затримку. Електролічильники можна налаштувати за допомогою LoRa класу C, щоб забезпечити дуже низьку затримку. NB-IoT краще підходить для цього додатка через необхідну високу швидкість передачі даних та частого обміну даними. Крім того, електролічильники зазвичай встановлюються в стаціонарних приміщеннях у густонаселених районах. Тому легко забезпечити покриття NB-IoT операторами стільникового зв'язку (LTE). [7]

1.5.2 Розумне землеробство

У сільському господарстві потрібен тривалий термін служби акумуляторів сенсорних пристроїв. Датчики температури, вологості та лужності можуть значно знизити споживання води та підвищити врожайність. Пристрої оновлюють отримані дані сенсорів кілька разів на годину, оскільки умови навколишнього середовища радикально не змінилися. Таким чином, Sigfox та LoRa ідеально підходять для даного застосування. Більше того, сьогодні багато фермерських господарств не мають стільникового покриття LTE; таким чином, NB-IoT не є рішенням для сільського господарства найближчим часом.

1.5.3 Автоматизація виробництва

Моніторинг обладнання в режимі реального часу перешкоджає зниженню промислового виробництва та дозволяє дистанційно керувати нею для підвищення ефективності. У автоматизації виробництва існують різні типи датчиків і вимоги до зв'язку. Деякі додатки вимагають частого зв'язку та високоякісного обслуговування, тому NB-IoT є кращим рішенням, ніж Sigfox та LoRa. Інші додатки вимагають недорогих датчиків та тривалий термін служби акумулятора для відстеження активів та моніторингу стану; у цьому випадку

Sigfox та LoRa - краще рішення. Через різні вимоги також можна було б також використовувати гібридні рішення. [7]

1.5.4 Розумна будівля

Датчики температури, вологості, безпеки, витрати води та електричних пробок сповіщають керуючих нерухомістю, щоб запобігти пошкодження і миттєво реагувати на запити, не маючи ручного монітора будівлі. Прибирання та використання будівель також може бути виконана більш ефективно. Ці датчики потребують низької вартості та довгого часу роботи акумулятора. Вони не вимагають якісного обслуговування або частого спілкування, тому Sigfox та LoRa краще підходять для цього класу додатків.

1.5.6 Термінали роздрібної торгівлі

Системи пунктів продажів вимагають гарантованої якості обслуговування, оскільки вони обробляють часті повідомлення. Ці системи мають безперервне джерело електроенергії, тому немає ніяких обмежень на тривалість експлуатації акумулятора. Існує також висока вимога низької затримки, тобто тривалий час затримки обмежує кількість транзакцій, які може зробити магазин. Таким чином, NB-IoT краще підходить для цього додатка.

1.5.7 Відстеження палет для логістики

В даний час для логістики вкрай бажане відстеження палет для визначення місця розташування товару та його стану. У цій області найбільш затребуваними вимогами є вартість пристрою та термін служби акумулятора. Відстеження палет є хорошим прикладом гібридного рішення. Транспортні

компанії можуть мати власну мережу для забезпечення гарантованого покриття своїх об'єктів. Недорогі IoT-пристрої можуть бути легко розгорнуті на транспортних засобах. Громадські базові станції Sigfox або LoRa можуть використовуватися, коли транспортні засоби знаходяться за межами об'єктів або коли товари прибувають до клієнтів. Однак, LoRa забезпечує більш надійну комунікацію, ніж Sigfox, коли рухається з високою швидкістю. Для NB-IoT мережа LTE може бути недоступною у всіх логістичних місцях, як правило, у сільській місцевості. Завдяки низькій вартості, тривалому терміну служби батареї та надійному мобільному зв'язку, LoRa найкраще підходить для цього додатка. [7]

Висновки:

Таким чином, в цьому розділі здійснено аналітичний огляд основних технічних характеристик технології LPWAN: проникаюча здатність, площа покриття, пропускна здатність, ефективність, споживання енергії й автономність, масштабованість, час затримки передачі сигналу, завадостійкість, діапазони частот, топологія та перспективи.

Розглянуто базові технології та протоколи передачі даних на довгій відстані в мережах IoT. Проведено порівняння трьох стандартів: LoRa, SIGFOX, NB-IoT, які використовуються у сфері побудови бездротових мереж LPWAN. Серед розглянутих рішень для LPWAN на поточний момент найбільш відпрацьованим рішенням, готовим до застосування є LoRaWAN. Даний стандарт має такі переваги — низька вартість розгортання мережі, тривалий термін роботи батареї, проста експлуатація, висока проникаюча здатність радіосигналів та працює в не ліцензованому діапазоні.

Найбільш досконалим і перспективним з технічної точки зору є стандарт NB-IoT. Мережа NB-IoT може бути розгорнута на базі існуючих мереж

стандарту LTE з використанням всіх переваг. Однак поширення даної технології стримується високою вартістю модернізації базових станцій, через що технологія NB-IoT може стати нерентабельною для операторів зв'язку.

Ще одним важливим фактом, на який варто звернути увагу, є зростаюча потреба в розробці нових і досить недорогих приймально-передавальних пристроїв для «Інтернету речей». В результаті актуальність LPWAN мереж буде тільки зростати, і дана технологія стане однією із затребуваних варіантів міжмашинної комунікації. До цього можна додати, що вже сьогодні внаслідок технічних переваг LPWAN реально використовувати для створення локальних мереж, які прийдуть на заміну мереж ближнього радіуса дії, таких як Wi-Fi і Bluetooth, які найчастіше застосовуються для створення бездротової системи зв'язку в межах будинку або офісу.

РОЗДІЛ 2.

ПАРАМЕТРИ, ЯКІ НАЙБІЛЬШЕ ВПЛИВАЮТЬ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕРЕЖІ LPWAN

Пристрої, такі як датчики, часто працюють від вбудованих батарей і, відповідно, мають обмежений запас енергії. У мережах з великомасштабним розгортанням сенсорних вузлів термін служби цих пристроїв повинен становити місяці або роки. У деяких умовах експлуатації часта заміна батарей стає дорогою і недоцільною, а часом і просто неможливою. Тому з метою економії енергії пристрої (наприклад, сенсорні вузли) зазвичай функціонують з дуже коротким робочим циклом і більшу частину часу знаходяться в режимі очікування або в сплячому режимі, активуючись лише при необхідності або відповідно до розкладу.

У високопродуктивних пристроях і шлюзах на процесор, дисплей і бездротові модулі припадає велика частина загального енергоспоживання. Річ у тім, що ці пристрої оснащені декількома бездротовими інтерфейсами, і найчастіше вони, для виконання більш складних завдань обробки, повинні знаходитися в активному режимі. Щоб правильно оцінити енергоспоживання цих пристроїв, необхідно належним чином розглянути управління живленням і врахувати складну взаємодію різних компонентів і модулів.

Щоб оптимізувати термін служби батареї, важливо знати поточні умови її експлуатації і тривалість кожного режиму роботи IoT-пристрою. Кількість споживаної електроенергії визначає термін служби батареї. Для його прогнозування необхідно знати ефективність і результат кожного типу вимірювання датчиком або, якщо це актуатор, дії, кажучи в загальному — активності. Вимірювання струму може бути єдиним доступним і прийнятним способом визначення тривалості певної події обробки або дії. Ключовою проблемою тут є необхідність вимірювання струму в широкому динамічному

діапазоні — менш ніж від мікроампера в сплячому режимі до сотень міліампер в активному режимі. При цьому і розробнику системи, і її інтегратору потрібен аналіз розряду батареї з безперервним (так званим безшовним) діапазоном вимірювання струму. Це потрібно для захоплення максимального (пікового) споживання, причому при мінімальних робочих циклах, і оцінки низьких середніх значень.

У підсумку все це застосовується при моделюванні умов функціонування мережі. Незалежно від того, використовується справжня батарея або джерело живлення, розробник повинен переконатися, що пристрій підключено до живлення належним чином. Це потрібно, щоб результати розряду батареї були характерні для пристрою, коли воно фактично діє в реальних умовах.

Тут необхідно враховувати ще один момент. Завдяки таким досягненням, як збір вільної енергії (energy harvesting — процес, за допомогою якого енергія витягується із зовнішніх джерел, наприклад електромагнітного випромінювання, тепла, вібрації, світла та ін.), нові технології батарей і конструкції з низьким енергоспоживанням, термін служби батареї продовжується. Застосування комірок меншого розміру, вузьких смуг пропускання і мереж зв'язку з низьким енергоспоживанням також допомагає знизити енергетичні обмеження. Для того щоб досягти заданого терміну служби й вирішити проблеми тепла, необхідно проводити систематичний енергетичний аналіз. Це допомагає підтримувати хороше управління для досягнення високої апаратної та програмної продуктивності пристрою. Описане вище особливо важливо в реальній роботі, де умови навколишнього середовища і поведінка мережі можуть значно скоротити термін служби IoT-пристрою.

2.1 Мінімізація енергоспоживання при використанні Raspberry Pi

Споживання енергії Raspberry Pi — це те, що потрібно враховувати при створенні проектів. Це особливо вірно, коли ці проекти живляться від акумуляторів. Знання того, скільки струму буде споживатися мікрокомп'ютером Raspberry Pi, дозволяє визначити, які батареї використовувати і як довго вона буде працювати.

Протестовані в декількох випадках:

Перший - «Idling», тобто Raspberry Pi увімкнена, але не виконує ніяких операцій.

Другий «Loading LXDE» - це величина мА, необхідна при завантаженні графічної системи LXDE (Raspbian).

Третій «Watch 1080p Video» відтворення відео з карти пам'яті, на якій знаходиться система.

Четвертий «Shoot 1080p Video», записує відео за допомогою камери. Звичайно, це відео зберігається на карті пам'яті.

Монітор, підключений через HDMI та клавіатура через USB, були підключені до кожного з Raspberry Pi під час тестування. Raspberry Pi, що має вбудований бездротовий модуль (Zero W і 3B), була підключена до мережі WiFi. Результати наведені в таблиці 2.1 та на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1

Результати використання енергії Raspberry Pi

	Zero	Zero W	A+	A	B+	B	Pi2B	Pi3B
	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA	/mA
Idling	100	120	100	140	200	360	230	230
Loading LXDE	140	160	130	190	230	400	310	310
Watch 1080p Video	140	170	140	200	240	420	290	290
Shoot 1080p Video	240	230	230	320	330	480	350	350

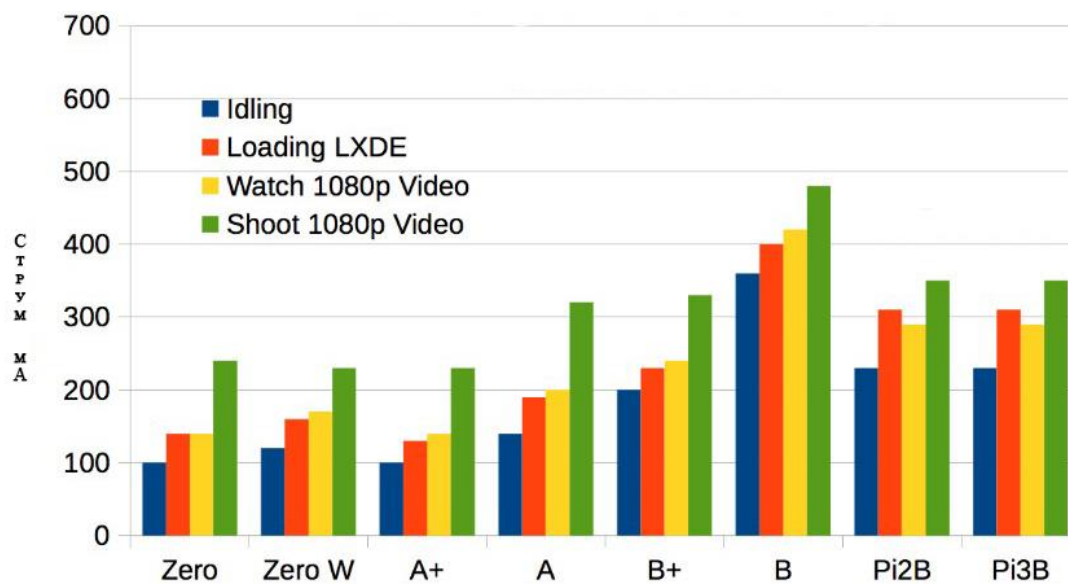


Рис. 2.1 Графік використання енергії Raspberry Pi

Щоб отримати дані про поточне споживання фактичної споживаної потужності, потрібно підставити їх у формулу (2.1), і можна підрахувати, скільки Вт вона використовує.

$$P = U * I * \cos(\varphi) \quad (2.1)$$

P — потужність пристрою (виражене в Вт);

U — напруга живлення;

I — сила струму в амперах (дані з таблиці вище, в міліамперах $1\text{a} = 1000\text{mA}$);

$\cos(\varphi)$ — коефіцієнт потужності (для простоти будемо вважати рівним «1»);

$$\text{Raspberry Pi Zero W: } P = 5 * 0,170 * 1 = 0,85 \text{ Вт}$$

Цей результат можна помножити на 24 години, тоді отримаємо щоденне споживання в Вт/год. У випадку з Raspberry Pi Zero W це буде 20,4 Вт/год в день.

Таблиця з інформацією про те, скільки енергії споживає кожна модель Raspberry Pi, наведена нижче (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2

Результати використання енергії Raspberry Pi

	Zero (W)	Zero W (W)	A+ (W)	A (W)	B+ (W)	B (W)	2B (W)	3B (W)
Idling	0.5	0.6	0.5	0.7	1	1.8	1.15	1.15
Loading LXDE	0.7	0.8	0.65	0.95	1.15	2	1.55	1.55
Watch 1080p Video	0.7	0.85	0.7	1	1.2	2.1	1.45	1.45
Shoot 1080p Video	1.2	1.15	1.15	1.6	1.65	2.4	1.75	1.75

Raspberry Pi Zero та Zero W мають найнижче енергоспоживання, в той час як Pi B має найвищу. Тому Raspberry Pi Zero та Zero W доцільніше використовувати для модулів LoRa, щоб продовжити термін служби батареї.

Фактори, що впливають на енергоспоживання:

- Приєднані USB-пристрої споживають енергію з USB-портів Raspberry Pi
- Клавіатури та миші споживають різний струм в залежності від марки або дизайну.
- Вбудований WiFi та Bluetooth будуть споживати енергію, якщо вони не відключені.
- Моделі Raspberry Pi з декількома ядрами використовуватимуть більше енергії
- Елементи, приєднані до GPIO, отримуватимуть живлення через контакти 3,3 В та 5 В

Висновки:

Для мінімізації енергоспоживання необхідно:

- щоб пристрої (наприклад, сенсорні вузли) функціонували з дуже коротким робочим циклом і більшу частину часу знаходилися в режимі очікування або в сплячому режимі, активуючись лише при необхідності або відповідно до розкладу;
- застосовувати комірки меншого розміру, вузькі смуги пропускання і мережі зв'язку з низьким енергоспоживанням;
- проводити систематичний енергетичний аналіз;
- вимірювати струм, бо це єдиний доступний і прийнятний спосіб визначення тривалості певної події обробки або дії;
- належним чином розглянути управління живленням і врахувати складну взаємодію різних компонентів і модулів;
- знати поточні умови експлуатації батареї та тривалість кожного режиму роботи IoT-пристрою.

Raspberry Pi Zero та Zero W мають найнижче енергоспоживання, тому їх доцільніше використовувати для модулів LoRa, щоб продовжити термін служби батареї.

РОЗДІЛ 3.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ LORAWAN

3.1 Технічні характеристики

Для проведення експериментальних досліджень необхідні наступні компоненти: 3 модуля LoRa HAT SX1268 з робочою частотою 433 МГц, Raspberry Pi Zero W, 3 кабелі USB type A plug to micro, 3 антени 433 МГц (2 dBi), програмне забезпечення SSCOM.

Raspberry Pi - це одноплатний комп'ютер Linux. Він був розроблений Британським Фондом Raspberry, який мав на меті стимулювати вивчення базових комп'ютерних наук у школах за допомогою дешевого обладнання та безкоштовного програмного забезпечення. [16]

Raspberry Pi Zero W (рис. 3.1) побудований на системі-на-чипі (SoC) Broadcom BCM2835, яка включає в себе процесор 32-розрядний 1-ядерний ARMv6Z ARM1176JZF-S з тактовою частотою 1 ГГц, графічний 2-ядерний співпроцесор Video Core IV Multimedia і 512 МБ оперативної пам'яті. Твердий диск відсутній, натомість Raspberry Pi використовує SD-карту в якості зберігаючого носія і має 1 порт Micro-USB 2.0, HDMI (підтримка виходу звуку), модуль WiFi з підтримкою 802.11n та Bluetooth 4.1. [16] Плата має багатофункціональну функцію 40-контактного піну GPIO, до складу якого входять SPI, цифровий введення / виведення та UART інтерфейс. [16] Операційна система є відкритим кодом Linux, також вона може отримувати доступ до бездротових мереж та чіпів Bluetooth. З розвитком Інтернету речей, Raspberry Pi має різноманітні апаратні з'єднання з інтерфейсом USB. За допомогою Raspberry Pi можна сформувати мережевий вузол, з'єднавши його з маршрутизатором і датчиком.

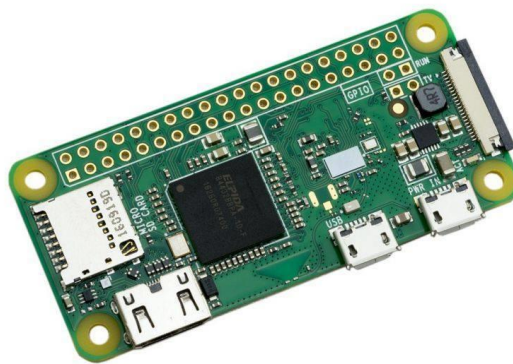


Рис. 3.1 Одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi Zero W

Модуль LoRa HAT для Raspberry Pi на базі SX1268 (рис. 3.2), що працює на частоті 433 МГц і дозволяє передавати дані до 5 км через послідовний порт. Завдяки використанню технології модуляції з розширеним спектром LoRa нового покоління максимальна дальність зв'язку модуля становить 5 км, а також підтримується автоматичне повторення передачі даних при виникненні помилок передачі. Інші функції включають Wake on Radio, бездротову конфігурацію, визначення несучої, ключ зв'язку і так далі. У порівнянні зі звичайними модулями LoRa, SX1268 LoRa HAT забезпечує більшу дальність зв'язку, більш високу швидкість, низьке споживання, кращу безпеку і захист від перешкод. Він підходить для різних додатків, таких як промислове управління обладнанням, розумний будинок, збір даних тощо.



Рис. 3.2 Модуль SX1268 LoRa для Raspberry Pi з робочою частотою 433 МГц від Waveshare

Особливості:

- стандартний роз'єм Raspberry Pi 40PIN GPIO (інтерфейс для зв'язку між компонентами комп'ютерної системи, наприклад, мікропроцесором і різними периферійними пристроями), підтримує плати серії Raspberry Pi;
- вбудований перетворювач USB TO UART CP2102 для послідовного налагодження;
- інтерфейс управління UART (використовується як стандартний послідовний інтерфейс передачі даних між різними пристроями), для підключення хост-плат, таких як Arduino / STM32;
- 4 світлодіодних індикатора для контролю стану модуля.
- технологія модуляції з розширеним спектром LoRa, до 84 доступних каналів сигналу, велика дальність зв'язку, підвищена стійкість до перешкод;
- автоматичне багаторівневе повторення передачі, підходить для наддалекого зв'язку, дозволяє використовувати кілька мереж в одному регіоні;
- функції низького енергоспоживання, такі як глибокий сон і пробудження по радіо, ідеально підходять для додатків з живленням від батареї;
- настроюваний закритий ключ зв'язку значно підвищує безпеку, призначених для користувача, даних;
- підтримує LBT, відстежуючи шум каналу сигналу перед передачею, значно покращує коефіцієнт успішності в екстремальних умовах;
- підтримує інтенсивність сигналу RSSI, для оцінки якості сигналу, налаштування мережі;

- підтримує налаштування параметрів бездротової мережі, відправляючи пакет бездротової команди / даних, віддалено налаштовуючи або отримуючи параметр модуля;
- підтримка фіксованої передачі, широкомовної передачі, моніторингу каналу сигналу.

В таблиці 3.1 наведено технічні характеристики модуля SX1268 LoRa HAT 433. [17]

Таблиця 3.1

Технічні характеристики модуля SX1268 LoRa HAT 433

RF модуль	SX1268
Діапазон частот	410,125 ~ 493,125 МГц
Антенa	Антенa 433 МГц (2 dBi)
Швидкість радіо	0,3 Кбіт/с ~ 62,5 Кбіт /с (програмується)
Потужність передачі	22,0 дБм (програмується 10/13/17/22 дБм)
Чутливість приймача	-147 дБм (швидкість радіозв'язку 2,4 Кбіт / с)
Споживана потужність	Струм передачі: 110 мА (перехідне споживання); струм прийому: 11 мА; струм сну: 2 мА (програмне відключення модуля LoRa)
Інтерфейс зв'язку	UART (рівень TTL)

Продовження таблиці 3.1

Швидкість передачі даних	1200 біт / с ~ 115200 біт / с (9600 біт / с за замовчуванням)
Довжина пакета	240 байт (програмується 32/64/128/240 байт)
Внутрішній кеш даних	1000 байт
Експериментальна відстань зв'язку	5 км (стан: безхмарний день, відсутність перешкод, висота над рівнем моря 2,5 м, посилення антени 5 dBi, швидкість радіозв'язку 2,4 Кбіт / с)
Джерело живлення	5 В
Рівень логіки	3.3 В / 5В
Робоча температура	40 ~ 85 ° С
Додатки	Розумний будинок, промислові датчики, автоматизація будівель, інтелектуальні лічильники

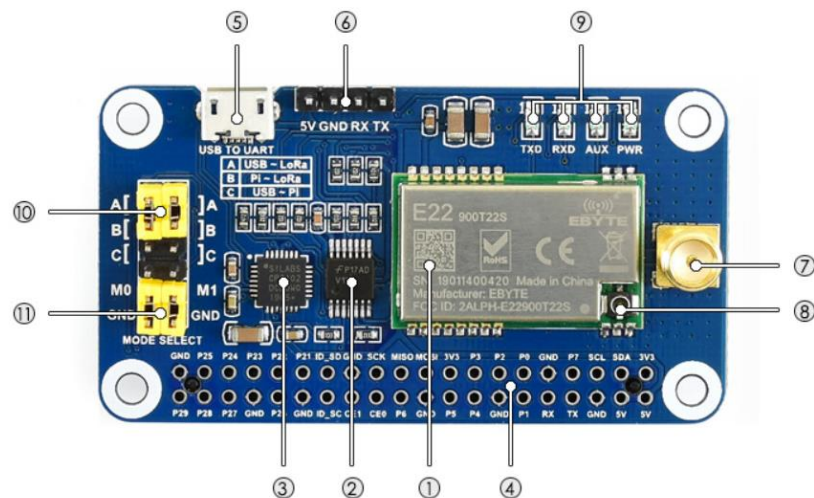


Рис. 3.3 Опис модуля SX1268 LoRa HAT

Розташування та призначення компонентів плати (рис. 3.3) [17]:

1. SX1268 LoRa модуль.
2. 74HC125V: перетворювач рівня напруги.
3. CP2102: конвертер USB TO UART.
4. Роз'єм Raspberry Pi GPIO: для з'єднання з Raspberry Pi.
5. Micro USB роз'єм USB TO UART порту.
6. Майданчики UART для підключення хост-плат, таких як STM32 / Arduino.
7. SMA антенний роз'єм.
8. Роз'єм антени IPEX.
9. Індикатори:
 - RXD / TXD: індикатор UART RX / TX;
 - AUX: допоміжний індикатор;
 - PWR: індикатор живлення.
10. UART вибір перемичок:
 - А: керування модулем LoRa через USB TO UART;
 - В: керування модулем LoRa через Raspberry Pi;
 - С: доступ до Raspberry Pi через USB TO UART.
11. Перемички вибору режиму LoRa:
 - замкнутий M0, замкнутий M1: режим передачі;
 - замкнутий M0, розімкнений M1: режим конфігурації;
 - розімкнений M0, замкнутий M1: режим WOR;
 - розімкнений M0, розімкнений M1: режим глибокого сну.



Рис.3.4 Антена 433 МГц (2 dBi)

3.2 Розгортання мережі LORAWAN

Налагодження:

1. Для тестування необхідно два модулі SX1268 LoRa HAT (далі - LoRa HAT), два мікро USB-кабелі.
2. Під'єднуємо антени SMA до LoRa HAT. Встановлюємо перемички на А та M0, M1 на GND.
3. Приєднуємо USB до інтерфейсів UART двох LoRa HAT до Raspberry Pi за допомогою мікро USB-кабелів.
4. Перевіряємо COM-порти в диспетчері пристроїв
5. Відкриваємо програмне забезпечення SSCOM, встановлюємо послідовні порти на 9600, 8N1 і здійснюємо передачу даних.

Використання з Raspberry Pi:

Спочатку завантажуюмо демо-коди, потім копіюємо каталог RaspberryPi з кодами в директорію /boot, а потім переміщаємо його в каталог / home /pi

1. Підключення устаткування

Для тестування кодів необхідно налаштувати два пристрої з однією платою Raspberry Pi та двома LoRa HAT.

Встановлюємо один модуль LoRa HAT на Raspberry Pi (пристрій 1), потім вмикаємо перемички на В і вимикаємо M0, M1 (рис. 3.5).

Підключаємо інший модуль LoRa HAT до Raspberry Pi (пристрій 2), потім встановлюємо перемички на A і вмикаємо M0 і M1 на GND (рис.3.5).

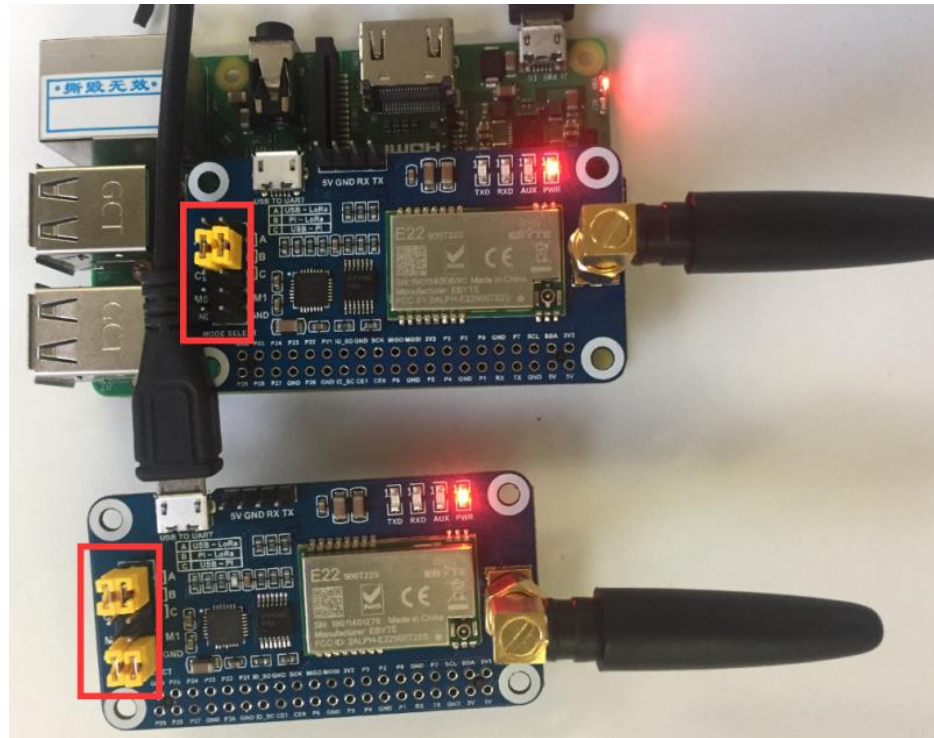


Рис. 3.5 Два пристрої з однією платою Raspberry Pi та двома LoRa HAT

2. Вмикаємо послідовний порт

Відкриваємо термінал Raspberry Pi

Запускаємо команду **sudo raspi-config**, щоб відкрити інтерфейс Конфігурація.

Вибираємо Параметри інтерфейсу -> Послідовний (Serial) -> Ні -> Так.

3. Встановлюємо бібліотеки

Бібліотеки, які повинні бути встановлені наперед

```
sudo apt-get install python-pip
sudo pip install RPi.GPIO
sudo apt-get install python-smbus
sudo apt-get install python-serial
```

4. Прозора комунікація (рис. 3.6)

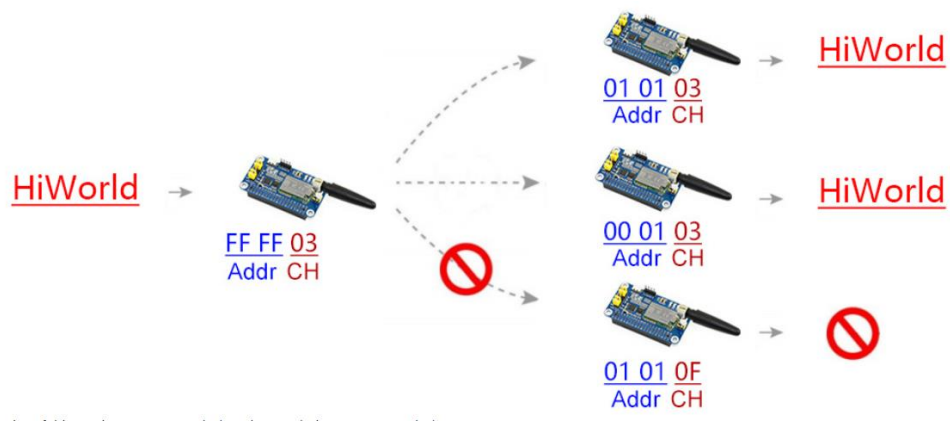


Рис. 3.6 Схема прозорії трансляції

Переходимо в директорію transparent

```
cd ~/RaspberryPi/transparent
```

Запускаємо код (рис. 3.7)

```
sudo python transparent.py BROADCAST_AND_MONITOR
```

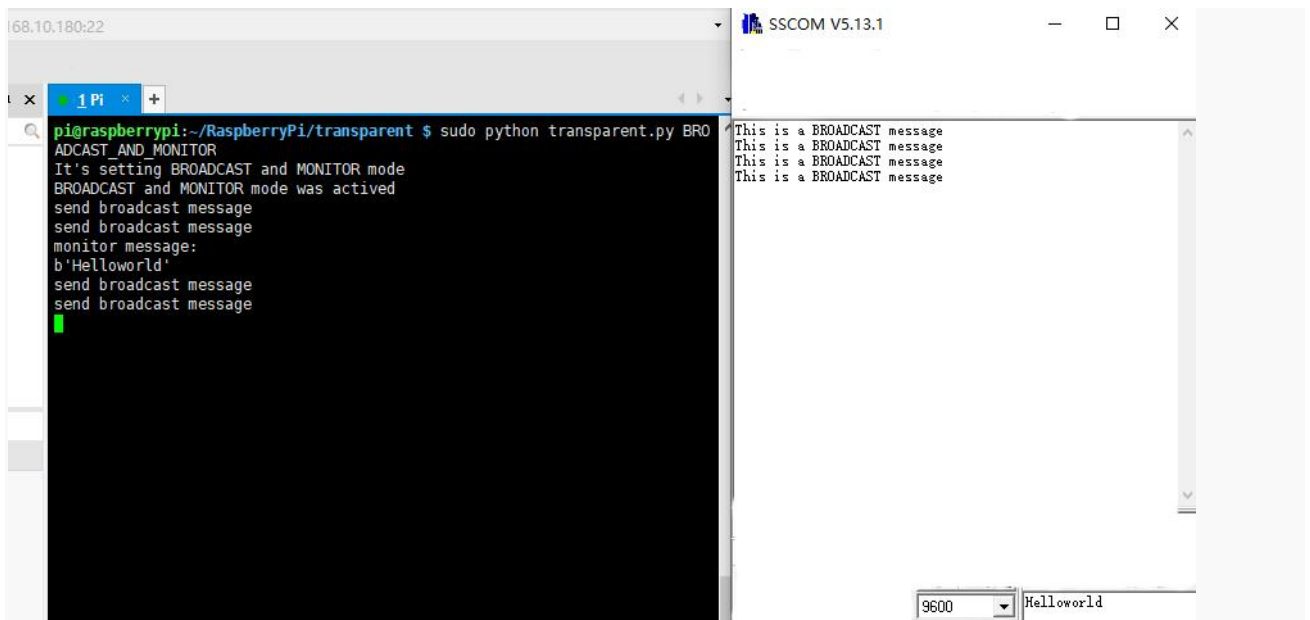


Рис. 3.7 Результат запуску команди BROADCAST

Щоб зробити спілкування "Point to Point" (рис.3.8), скористаємося командою P2P (рис. 3.9)

```
sudo python transparent.py P2P
```

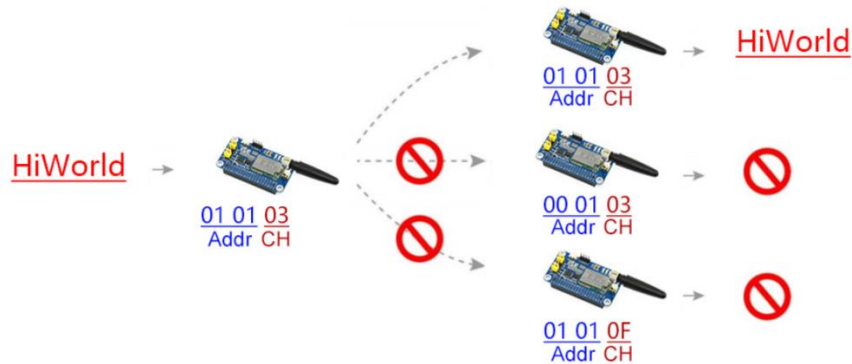


Рис. 3.8 Схема прозорї комунікації «від точки до точки»

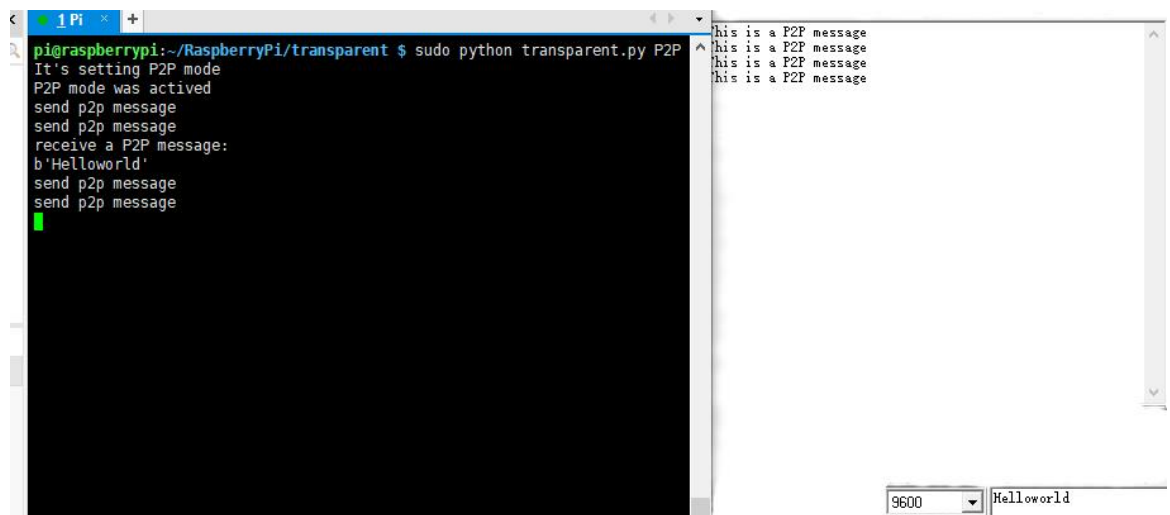


Рис. 3.9 Результат запуску команди P2P

5. Релейний зв'язок

Релейний (ретрансляційний) зв'язок - одна з форм наддалекого зв'язку. У режимі ретрансляції адресний регістр LoRa NAT використовується для переадресації NETID, та сполучення замість автоматичного прийому / передачі, також не може бути виконана при низькому споживанні.

Щоб протестувати приклад з реле, знадобиться як мінімум три НАТ-носії LoRa.

Візьмемо перші три LoRa НАТ як LoRa A, LoRa B і LoRa C.

Підключаємо LoRa B до Raspberry Pi (рис.3.10) і встановлюємо його в режим ретрансляції. Для цього встановлюємо M0 на GND і вимикаємо M1, потім налаштовуємо регістр ADDH на 0x01, ADDL на 0x02, REG3 на 0x23 за допомогою команди: C1 00 09 01 02 00 62 00 12 23 00 00 (HEX). Після конфігурації вмикаємо перемички M1 і M0 на GND.

Підключаємо LoRa C до Raspberry Pi (рис.3.10) і встановлюємо його в якості виноски. Для цього встановлюємо M1 на GND і вимикаємо M1, потім налаштовуємо регістр ADDH на 0x03, ADDL на 0x04, NETID на 0x04 за допомогою команди: C1 00 09 00 00 02 62 00 12 03 00 00 (HEX). Після конфігурації вмикаємо перемички M1 і M0 на GND

Встановлюємо LoRa A на Raspberry Pi (рис.3.10), вмикаємо перемички на A і вимикаємо M1, M0.

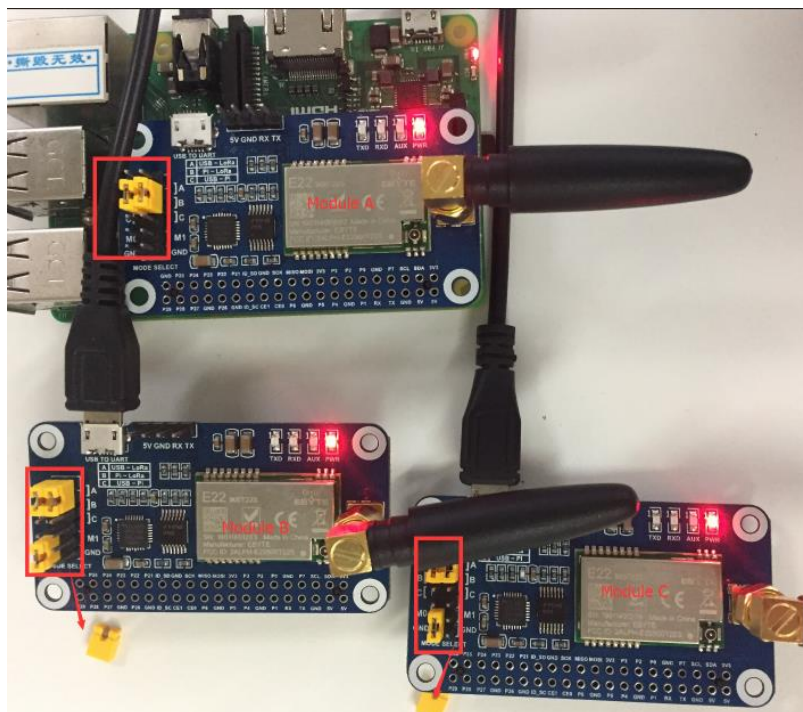
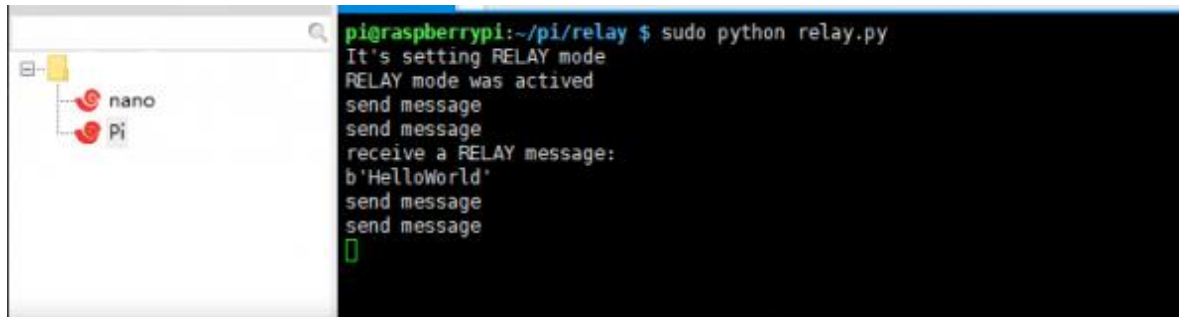


Рис. 3.10 Підключення три НАТ-носії LoRa до Raspberry Pi

Переходимо у директорію relay та запускаємо код

```
cd ~/RaspberryPi/relay
sudo python relay.py
```



```

pi@raspberrypi:~/pi/relay $ sudo python relay.py
It's setting RELAY mode
RELAY mode was activated
send message
send message
receive a RELAY message:
b'HelloWorld'
send message
send message

```

Рис. 3.11 Lora A: результат запуску команди relay

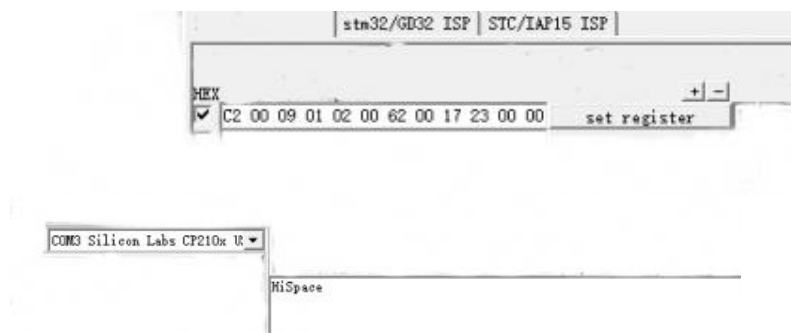


Рис. 3.12 Lora B: результат запуску команди relay

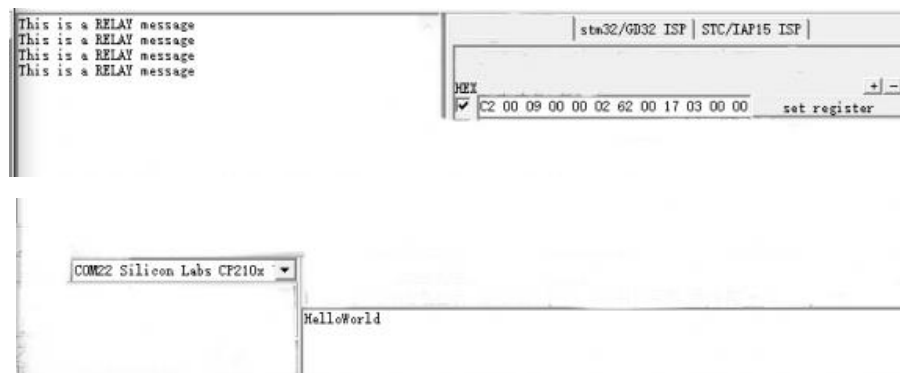


Рис. 3.13 Lora C: результат запуску команди relay

6. Режим WOR

Під час роботи в режимі WOR споживання LoRa HAT низьке. У режимі WOR передача даних має затримку, може житися від акумуляторів через низьке споживання.

Для тестування режиму WOR необхідні два LoRa HAT.

Встановлюємо LoRa HAT на Raspberry Pi (пристрій 1) та вмикаємо перемички на B, вимикаємо M1 і M0.

Підключаємо LoRa HAT до Raspberry Pi (пристрій 2) та встановлюємо його в режим WOR. Перед конфігурацією необхідно встановити M1 на GND і вимкнути M1, після конфігурації вмикаємо M1 на GND, вимикаємо M0.

Переходимо у директорію WOR та запускаємо код

```
cd ~RaspberryPi/wor  
sudo python wor.py
```

Дані, передані за допомогою пристрою 1, будуть прийняті пристроєм 2 із затримкою.

Висновки:

Розроблено практичні рекомендації для розгортання мережі LPWAN. Для розгортання використовувався модуль SX1268 LoRa з робочою частотою 433 МГц від Waveshare та одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3. Передача даних відбувалася в різних режимах: прозора трансляція за допомогою команди BROADCAST, прозора комунікація «від точки до точки» за допомогою команди P2P, ретрансляційний зв'язок та WOR. Під час роботи в режимі WOR споживання LoRa HAT дуже низьке, може житися від акумуляторів через низьке споживання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1) Здійснено аналітичний огляд основних технічних характеристик технології LPWAN: проникаюча здатність, площа покриття, пропускна здатність, ефективність, споживання енергії й автономність, масштабованість, час затримки передачі сигналу, завадостійкість, діапазони частот, топологія та перспективи.

2) Розглянуто базові технології та протоколи передачі даних на довгі відстані в мережах IoT, які входять до складу мереж LPWAN: LoRaWAN, SigFox, NB-IoT. Проведено порівняльний аналіз технічних характеристик технологій LPWAN таких, як якість обслуговування, термін служби акумулятора та затримка, масштабованість та тривалість корисного навантаження, покриття мережі та діапазон, модель розгортання, вартість. Наведено відповідні переваги Sigfox, LoRa та NB-IoT щодо факторів IoT. Також наведено приклади застосування, яка технологія найбільше підходить для різних цілей.

3) Проведена оцінка параметрів, які найбільше впливають на енергетичну ефективність мережі LPWAN для Інтернету речей. Для мінімізації енергоспоживання необхідно: щоб пристрої (наприклад, сенсорні вузли) функціонували з дуже коротким робочим циклом і більшу частину часу знаходилися в режимі очікування або в сплячому режимі, активуючись лише при необхідності або відповідно до розкладу; застосовувати комірки меншого розміру, вузькі смуги пропускання і мережі зв'язку з низьким енергоспоживанням; проводити систематичний енергетичний аналіз; вимірювати струм, бо це єдиний доступний і прийнятний спосіб визначення тривалості певної події обробки або дії.

4) Розроблено практичні рекомендації для розгортання мережі LPWAN. Для розгортання використовувався модуль SX1268 LoRa для Raspberry Pi з

робочою частотою 433 МГц від Waveshare та одноплатний мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. What is LPWAN? // електрон. текст. дані URL:
<https://behrtech.com/lpwan-technology/>
2. LPWAN White Paper // електрон. текст. дані URL:
<https://www.leverage.com/research-papers/lpwan-white-paper>
3. LPWAN Overview // електрон. текст. дані URL:
<https://tools.ietf.org/id/draft-ietf-lpwan-overview-08.html#rfc.section.2.3>
4. White Paper: LoRaWAN: global standard for Low Power Wide Area IoT networks // електрон. текст. дані URL:
<https://iotbusinessnews.com/download/white-papers/ACTILITY-LoRaWAN-white-paper.pdf>
5. What is the LoRaWAN? // електрон. текст. дані URL: <https://loralliance.org/about-lorawan>
6. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment // електрон. текст. дані URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917306057#s0010>
7. Low-Power WAN (LPWAN) for IoT long-range communication // електрон. текст. дані URL:
<https://www.ednasia.com/Low-Power-WAN-LPWAN-for-IoT-long-range-communication/>
8. Интернет вещей: LoRa устройства от Mikrotik // електрон. текст. дані URL:
<https://lanmarket.ua/stats/internet-veshchey-lora-ustroystva-ot-mikrotik/>
9. Спецификация LoRaWAN. Введение. Основные понятия и классы оконечных устройств // електрон. текст. дані URL:
<https://habr.com/ru/post/316954/>

10. Сравнительные характеристики широкополосных и узкополосных сетей LPWAN нелицензируемого диапазона для приложений M2M и IoT // электрон. текст. дані URL: <https://wireless-e.ru/standarty/seti-lpwwan-dlya-prilozhenij-m2m-i-iot/>
11. SIGFOX TECHNOLOGY // электрон. текст. дані URL: <https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology>
12. SigFox Vs. LoRa: A Comparison Between Technologies & Business Models // электрон. текст. дані URL: <https://www.link-labs.com/blog/sigfox-vs-lora>
13. Narrowband IoT (NB-IoT) // электрон. текст. дані URL: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/iot/resources/innovation-technology/nb-iot>
14. White paper: Narrowband Internet of Things // электрон. текст. дані URL: https://www.mobilewirelesstesting.com/wp-content/uploads/2018/03/1MA266_0e_NB_IoT.pdf
15. White Paper: NB-IoT // электрон. текст. дані URL: <https://carrier.huawei.com/en/technical-topics/wireless-network/NB-IoT/NB-IoT-White-Paper>
16. Модуль SX1268 LoRa для Raspberry Pi // электрон. текст. дані URL: <http://arduino.ua/prod3626-modul-sx1268-lora-dlya-raspberry-pi-s-rabochei-chastotoi-433-mgc>
17. Raspberry Pi // электрон. текст. дані URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi